

朱波 钱宇白 编著

材料加热设备 及自动控制



山东大学出版社
Shandong University Press

材料加热设备及自动控制

朱 波 钱宇白 编著

山东大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

材料加热设备及自动控制/朱波, 钱宇白编著. — 济南: 山东大学出版社, 2002. 11

ISBN 7-5607-2520-1

I. 材... II. ①朱... ②钱... III. ①加热设备 — 高等学校 — 教材 ②加热设备 — 自动控制 — 高等学校 — 教材 IV. TK17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 088282 号

山东大学出版社出版发行

(山东省济南市山大南路 27 号 邮政编码: 250100)

山东省新华书店经销

山东日照日报社印刷厂印刷

787×1092 毫米 1/16 13.25 印张 306 千字

2002 年 11 月第 1 版 2002 年 11 月第 1 次印刷

印数: 1—1000 册

定价: 28.00 元

版权所有, 盗印必究

(图书如有缺页、倒页、漏页, 由本社发行部负责调换)

前 言

为满足计算机、通信、航空、航天和机械产品技术发展的需要,各种新材料应运而生,具有耐高温、耐磨损、耐腐蚀、高强度等优越性能的材料已显示出广阔的发展前景。研究和生产这些高性能的材料及制品,常需要在高温下进行,对温度、压力、气氛及其他工艺条件要求非常严格,没有先进的加热设备,就不能实现先进的材料生产工艺,加热设备的现代化是获得高性能材料及制品的必要条件。

加热设备是一门综合性的应用学科,涉及的知识面很广,要求设计人员具有较坚实的传热学、气体力学、机械学、电工学及材料科学等学科的理论基础,还应具有较丰富的生产实践经验和有关加工制造的基本知识。

我国加热设备的制造水平与国外有较大差距,近年来国内围绕着节能,减少公害和提高产品质量,对加热设备进行了大规模的技术改造,设计出许多新型、高效、节能的加热设备,加热设备的发展及主要研究内容如下:

1. 采用新型筑炉材料,缩短空炉升温时间,减少炉子蓄热和散热损失,提高炉子热效率。
2. 提高设备的机械化和自动化程度,用计算机控制生产过程,提高控制精度。
3. 发展可控气氛炉和真空炉,提高产品质量。
4. 加强对炉子关键部件的研究,如传感器、加热装置、耐热构件、密封部件等,提高炉子可靠性。
5. 引进、消化、吸收国外加热设备的先进技术,提高我国炉子的设计制造水平。

随着高等院校教育体制改革的深入进行,需对学科设制、教材内容及学时进行适当调整,原有的教材已不能满足新学科的教学要求。由于材料科学技术的迅速发展,近年来国内外研制成功大量新型、高效节能、计算机控制的现代化材料加热设备,这些新技术应及时补充到教材中。基于上述两方面原因,特编写《材料加热设备及自动控制》教材,该书可作为高等院校材料科学和材料加工工程专业的本科生教材,也可作为材料工程领域工程硕士的教材。

本书共八章,第一、二、三章主要论述加热设备热工基础知识;第四章内容为电阻炉设计计算方法;第五、六、七章介绍金属材料、陶瓷材料及碳纤维的加热设备种类、结构组成、工作原理及应用范围;第八章介绍加热设备的自动控制知识。

为提高本书的实用性,在内容上重点介绍目前国内外先进的材料加热设备,删减了老

式加热设备的资料。本书各章附有习题和思考题,可进一步加强学生对所学知识的理解,提高分析问题、解决问题的能力。

本书由朱波、钱宇白编著。编者在多年从事本学科教学、科研和教材编写过程中,得到了黄国靖教授的教诲和指导,在此表示衷心的感谢。

书中的部分资料和图样选自有关书刊资料,在此谨向原著者表示谢意。

由于本教材是初次编写,且编者水平有限,难免有缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

2002年8月

目 录

第一章 气体力学基础	(1)
第一节 气体静力学基础.....	(1)
第二节 气体动力学.....	(6)
习题	(13)
思考题	(14)
第二章 传热原理	(15)
第一节 传热概论	(15)
第二节 传导传热	(17)
第三节 对流换热	(20)
第四节 辐射换热	(24)
习题	(36)
思考题	(37)
第三章 筑炉材料	(38)
第一节 耐火材料	(38)
第二节 保温材料	(43)
第三节 炉用耐热钢	(43)
思考题	(44)
第四章 电阻炉设计	(45)
第一节 电阻炉类型	(45)
第二节 电阻炉设计步骤	(47)
第三节 电阻炉结构设计	(48)
第四节 电阻炉功率计算	(53)
第五节 电阻炉功率分配、接线与调节.....	(57)
第六节 常用电热元件材料及性能	(61)

第七节 电热元件设计计算	(65)
第八节 电热元件焊接与安装	(71)
第九节 电阻炉性能试验	(75)
习题	(76)
思考题	(77)
第五章 金属材料加热设备	(78)
第一节 可控气氛密封式箱式炉	(78)
第二节 推杆式电阻炉	(81)
第三节 输送带式电阻炉	(85)
第四节 辊底式电阻炉	(87)
第五节 振底式电阻炉	(89)
第六节 真空电阻炉	(94)
第七节 燃料炉	(114)
思考题	(129)
第六章 陶瓷加热设备	(130)
第一节 隧道窑	(130)
第二节 辊道窑	(139)
第三节 推板窑	(142)
第四节 陶瓷间歇窑	(144)
思考题	(151)
第七章 碳纤维生产加热设备	(152)
第一节 预氧化炉	(152)
第二节 炭化炉	(155)
思考题	(157)
第八章 加热设备自动控制	(158)
第一节 加热设备自动化生产线	(158)
第二节 加热设备工艺参数控制策略	(160)
第三节 温度自动控制	(162)
第四节 气氛自动控制	(178)
第五节 压力及流量控制装置	(185)
第六节 加热设备生产线实例解析	(190)
思考题	(194)

附录.....	(195)
参考文献.....	(203)

第一章 气体力学基础

气体力学是研究气体平衡和运动规律的科学。气体的运动规律与材料加热设备的设计、操作、制品质量及能源消耗均有密切关系。气体的流动状态、运动方向与速度影响加热设备的传热过程、温度均匀性、气氛均匀性及设备安全操作,因此,只有掌握气体力学基本原理,才能有效解决材料加热设备设计、制造和生产中的一些复杂问题。

第一节 气体静力学基础

一、静止气体的能量

(一) 气体的压力、静压能、静压头

气体作用于单位面积上内法线方向的力称为气体的压力,物理学上称为压强。国际单位制中压力单位为帕斯卡(Pa), $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。

压力按其采用的零点不同,有两种表示方法:即绝对压力和相对压力。以绝对真空为计算起点的气体压力,称为绝对压力,用 p 表示。以大气压力为计算起点的气体压力称为相对压力或表压力,用 Δp 表示,其值可用压力表直接测量,如图 1-1 所示,用 U 形管测得的液柱高度差 h ,即表示相对压力:

$$\Delta p = p - p_a = \rho g h \quad (1-1)$$

式中 ρ 为液体的密度(kg/m^3); g 为重力加速度,等于 $9.8 \text{ (m/s}^2 \text{ 或 N/kg)}$; h 为 U 形管液面高度差(m)。

当 $\Delta p > 0$ 时,称为相对正压;当 $\Delta p = 0$ 时,称为相对零压;当 $\Delta p < 0$ 时,称为相对负压。相对负压也称为真空度,它不是气体的绝对压力,而是气体绝对压力小于大气压力的那部分压力的数值。

具有压力的气体可以作功。例如在图 1-2 中,气体可推动活塞做功 dA ,它等于气体的压力 p ,活塞面积 A 及活塞的位移 dl 三者的乘积,即:

$$dA = pAdl = p dV$$

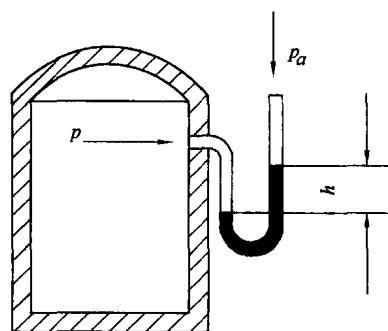


图 1-1 表压力的测量

而单位体积气体所做的功为:

$$dA/dV = p$$

单位体积气体所具有的作功能力称为静压能,用 E_s 表示, $E_s = p$ 。

由此可见,从力的角度来看, p 为气体具有的静压力,单位为 Pa;从能量的角度来看, p 则是气体的静压能,单位为 J/m³。因此,气体压力是气体分子储存能量的一种表现形式。欲知炉内气体和炉外空气之间如何相互作用,首先须了解炉气对炉外空气所具有的相对能量,通常借助于压头。压头的概念即为单位体积炉气与同一水平面上炉外单位体积空气能量之差。

将同一水平面上炉内外气体具有的静压能差称为静压头,用 h_s 表示,即:

$$h_s = p_g - p_a \quad (1-2)$$

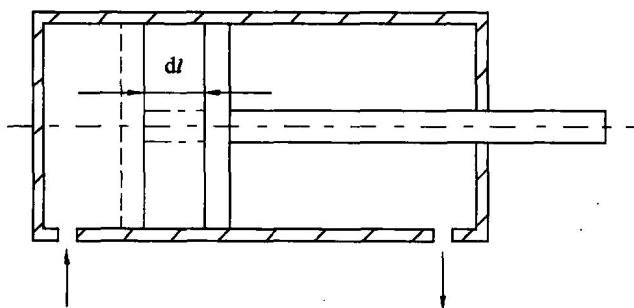


图 1-2 气体推动活塞作功

可见, h_s 在数值上等于炉气的相对压力,即表压力,故可直接测得。当 $h_s > 0$ 时, $p_g > p_a$, 炉气就有向炉外溢出的趋势;反之, $h_s < 0$ 时,就有吸入空气的趋势。

(二) 气体的位能、位压能和位压头

由物理学得知,在重力作用下,质量为 M ,距基准面的高度为 Z 的物体所具有的位能为 Mgz ,因此体积为 dv 的静止气体,在距基准面的高度为 z 时(见图 1-3)所具有的位能为:

$$Mgz = \rho dv g \cdot z$$

单位体积气体所具有的位能称为位压能,用 E_p 表示,其值为:

$$E_p = \frac{\rho dv g z}{dv} = \rho g z \quad (1-3)$$

由此可知,气体的位压能等于该气体的密度 ρ 、重力加速度 g 以及其距基准面高度 z 的乘积,可见,气体的位压能就是气体对某一基准面做功的本领,由于气体受地球引力的作用,表现为垂直向下做功的能力,因此距基准面越高,位压能越大。

单位体积炉气的位能与同一水平面上炉外单位体积空气的位能之差,称为位压头,常以 h_p 表示,即:

$$h_p = \rho_g g z - \rho_a g z = (\rho_g - \rho_a) g z \quad (1-4)$$

由式(1-4)可知,气体的位压头大小等于炉内气体与炉外空气的密度差、重力加速度

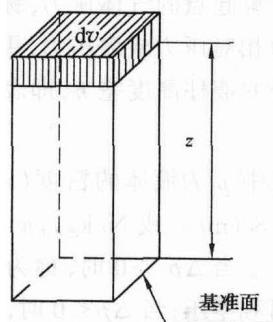


图 1-3 气体位能示意图

g 以及距基准面高度 z 的乘积。

二、静止气体平衡方程式及压力分布

静止气体平衡方程式描述了在连续、静止的气体内静压力与高度的关系。我们讨论气体处于静止状态,并且气体密度不随高度改变的体系。

在静止气体中取一垂直地面的微小六面体,其体积为 dv ,质量为 dm ,各边长分别为 dx, dy, dz ,如图 1-4 所示。气体的密度为 ρ ,现分析该六面体受力平衡关系。

由于气体呈平衡状态,因此所有作用于此六面体上的力在坐标轴上的投影之和应等于零。为使问题简单化,现只列出 z 轴方向的平衡方程式。

设该微元体下表面受的压力为 p ,上表面所受的

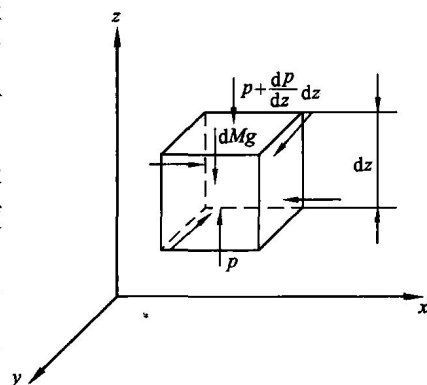


图 1-4 平衡气体的受力情况

$$p dx dy - \left(p + \frac{dp}{dz} dz \right) dx dy - dMg = 0$$

将 $dM = \rho dv = \rho dx dy dz$ 代入上式并消去 $dx dy$, 得:

$$dp = -\rho g dz$$

因 ρ 为常数,则将上式积分得:

$$p = -\rho g z + C$$

或:

$$p + \rho g z = C \quad (1-5)$$

如果在一空间内,气体处于静止状态,密度相同。在气体中任意取 1 点和 2 点,见图 1-5。选一基准面,1 点和 2 点的高度为 z_1 和 z_2 ,其压力为 p_1 和 p_2 ,两点距离为 l ,气柱的断面积为 dA ,由于该气柱为静止状态,故各个方向所受的力必然相互平衡。令 x, y 坐标轴分别与此气柱轴平行及垂直,气柱轴与铅垂线成 θ 角。

由 x 坐标轴受力分析可得:

$$p_2 dA - p_1 dA - \rho g l dA \cos \theta = 0$$

因为: $l \cos \theta = z_1 - z_2$

所以: $p_2 - p_1 - \rho g (z_1 - z_2) = 0$

移项得:

$$p_1 + \rho g z_1 = p_2 + \rho g z_2 \quad (1-6)$$

公式(1-6)是用机械能守恒定律描述气体静止状态的方程式,此式与(1-5)式相同,它表明了平衡气体内任一点,压力的大小与气体密度及位置高低的关系。

由式(1-5)和(1-6)可知:

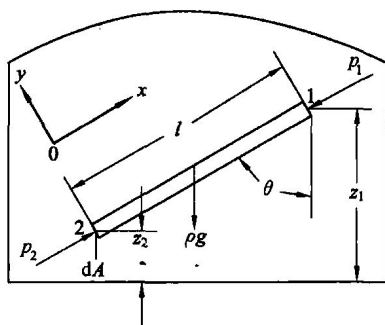


图 1-5 气体静平衡

(1) 在 ρ 为常数的静止气体中,压力沿高度呈直线分布,其斜率为 $-1/\rho g$ 。1面上的压力 p_1 等于2面上的压力 p_2 再加上1,2面间的气柱重量在1面上所产生的压力 $\rho g(z_2 - z_1)$ 。因此,静止气体的绝对压力随高度的增大而减小。

(2) 静止气体中任一高度的静压能与位压能之和为一常数,从能量角度看, p 和 $\rho g z$ 分别表示静止气体的静压能和位压能。

三、静止炉气的压头分布

(一) 静压头分布

静止炉气的静压头大小可用式(1-6)求得,对于在零压面之上 H 处的一截面,可列出:

$$p_0 = p_g + \rho_g g H$$

$$p_0 = p_a + \rho_a g H$$

两式相减并整理得:

$$h_s = p_g - p_a = (\rho_a - \rho_g) g H \quad (1-7)$$

式中 $\rho_a > \rho_g$,当 $H > 0$ 时, $h_s > 0$, H 值越大,静压头也越大。同理,在零压面以下,炉气的静压头为负,越往下负值

越大。由此可得出结论: ρ_g 为常数的静止炉气所具有的静压能沿高度方向呈直线分布。如图1-6所示。

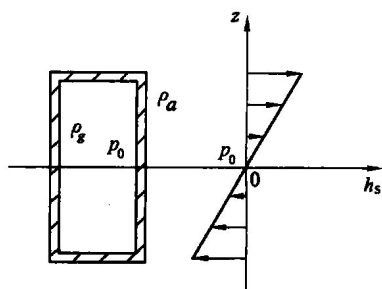


图 1-6 静止炉气的静压头分布

(二) 位压头分布

在研究气体压头分布时,基准面可以任意选取,为计算方便,常选在热气柱的顶部(见图1-7)。对加热炉来说, $\rho_g < \rho_a$,而按图1-7炉气的位标 z 前应冠以负号,则:

$$h_p = (-z)g(\rho_g - \rho_a) = (\rho_a - \rho_g)gz \quad (1-8)$$

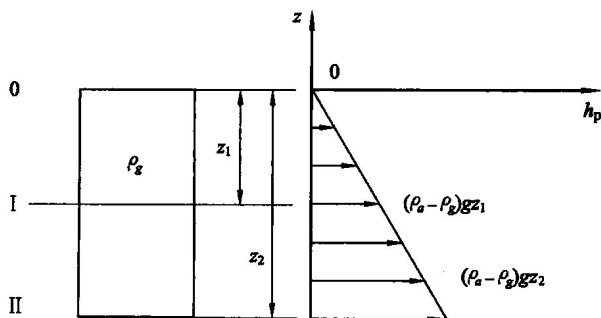


图 1-7 静止炉气的位压头分布

由此可得出结论:静止炉气的位压头沿其高度呈直线分布,由于 $\rho_a > \rho_g$,故越往下位压头越大。

位压头不能直接测量,而是由计算求得。

位压头还可以按浮力作用来理解。因为 $\rho_g < \rho_a$,则浮力大于重力,热气体要向上浮升,而且位置越低,上浮力越大。因此,位压头也是指气体上升或下降的趋势。其流动方向取决于气体在哪一种介质中,冷气体在比较轻的介质(热气体)中下降,热气体在比较重

的介质(冷气体)中上升。

在加热炉中,要使高温气体从炉顶向炉底流动,必须克服位压头这个阻力,如设烟囱来克服这一阻力。

(三) 静止炉气的总压头

根据式(1-6),对 I, II 截面的炉气和空气可分别列出以下两式:

$$p_{g1} + \rho_g g z_1 = p_{g2} + \rho_g g z_2$$

$$p_{a1} + \rho_a g z_1 = p_{a2} + \rho_a g z_2$$

两式相减,得:

$$(p_{g1} - p_{a1}) + (\rho_g - \rho_a) g z_1 = (p_{g2} - p_{a2}) + (\rho_g - \rho_a) g z_2$$

即:

$$h_{s1} + h_{p1} = h_{s2} + h_{p2} \quad (1-9)$$

由此可见,静止炉气在不同高度上,其静压头和位压头之和为一定值,二者可以相互转化,静压头大处,位压头必小,反之亦然,但其总压头不变,即压头守恒。

四、加热炉溢气和吸气

加热炉溢出热气体或吸入冷空气与静压头之间的关系如图 1-8 所示。

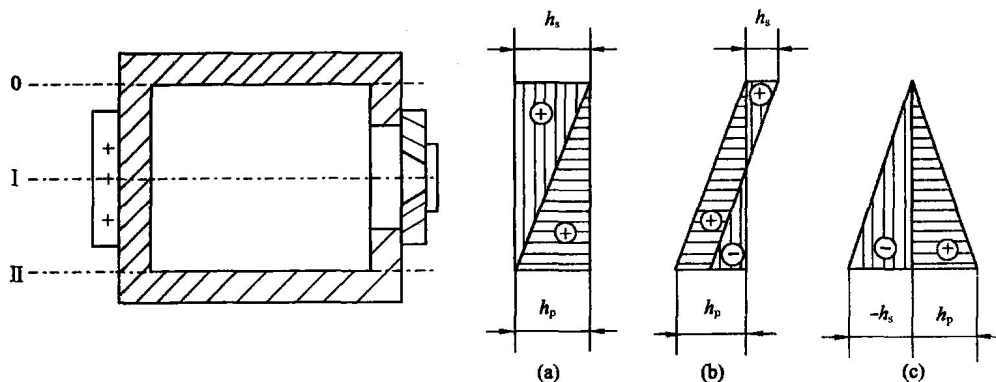


图 1-8 加热炉的静压头和位压头

(a) 零压面在炉底 (b) 零压面高于炉底 (c) 零压面在炉顶

1. 零压面控制在炉底

零压面在炉底,即 $h_{s2} = 0$,此时静压头和位压头的分布如图 1-8(a)所示,炉内静压头皆为正,即炉内炉气是正压,而且炉顶处炉气的正压最大,这时炉内热气体通过炉墙上的孔洞或缝隙向外溢出。

2. 零压面高于炉底

设 I 面为炉膛内任一平面, I 面为零压面,即 $h_{s1} = 0$ 。此时静压头和位压头的分布如图 1-8(b)所示,在 I 面以下,静压头为负值,炉底处静压头最小。I 面以上,静压头为正值,炉顶面静压头最大。在 I 面以下,通过炉墙孔洞和缝隙会吸入冷空气,而在 I 面以上则会向外溢出热气体。

3. 零压面控制在炉顶

此时炉顶面为零压面,即 $h_{s0}=0$, 整个炉膛内皆为负压,如图 1-8(c)所示,炉底负压的绝对值最大,这时炉外空气透过缝隙吸入炉内。

第二节 气体动力学

当气体受力不平衡时,就要发生运动,气体动力学就是研究气体运动规律及其应用的科学。气体在加热设备内或管道内流动过程中服从质量守恒定律和能量守恒定律。

一、气体流动的基本概念

(一) 流量和平均流速

气体流量是气体在单位时间内通过给定面积的气体量,依测量单位不同,流量可分为体积流量 q_v (m^3/s) 和质量流量 q_m (kg/s),即:

$$q_v = \frac{V}{t}; q_m = \frac{M}{t} \quad (1-10)$$

流体流经管道任一截面上各点的速度并不相等,在管壁处为零,到管道中心达到最大值。在工程上为方便起见常采用平均值,等于单位面积上的平均流量,即:

$$\omega = \frac{q_v}{f} \quad (1-11)$$

气体在标准状态下的流量和流速,分别称为标态流量 q_{v0} 和标态流速 ω_0 。对气体而言,体积是随温度和压力而变化的。根据气体基本定律,其流量 q_{vt} 和流速 ω_t 随温度的变化规律如下:

$$q_{vt} = q_{v0} \left(1 + \frac{t}{273} \right) \quad (1-12)$$

$$\omega_t = \omega_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right) \quad (1-13)$$

(二) 气体的黏性

气体流动时,其内部各层之间产生内摩擦力的性质,称为气体的黏性,黏性大小程度称为黏度。

图 1-9 中表示气体沿水平管道作层状流动时,由于附着力的作用,在管内壁上的速度 $\omega=0$ 。离管壁越远,速度越大,形成如图中所示的速度分布曲线。相邻两层之间因相对运动而产生的内摩擦力 F ,与层间交界面积 A 及相邻层的速度梯度 $d\omega/dn$ 成正比。即:

$$F = \mu A \frac{d\omega}{dn}$$

式中, μ 称为黏度系数或动力黏度,单位为 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

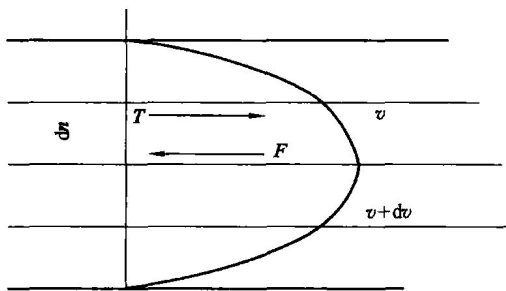


图 1-9 气体的黏性

气体黏度与压力关系不大,但随温度升高而增大,因为温度升高将增强气体分子的不规则运动,增大运动阻力。

不考虑黏性的气体称为理想气体。有时为简化问题的分析过程,常忽略气体的黏性。

(三) 气体的流动形态

气体流动时,具有两种不同的流动形态,即层流和紊流。

层流流动时,流体质点都作有规则的平行运动,层流之间不相混合,质点没有径向运动。稳定层流在管道截面上的速度分布呈抛物线状,如图 1-10 所示。截面上的平均速度一般取最大速度的 50%。

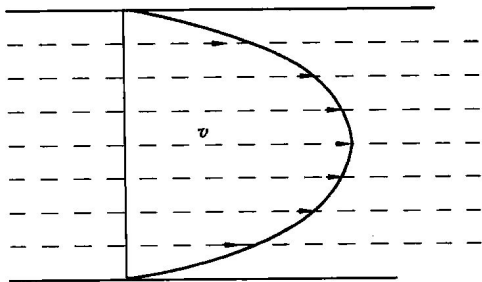


图 1-10 层流流动

紊流流动时,流体质点不仅沿前进方向运动,而且还向各个方向作不规则运动,不停地相互混合。紊流时,管壁处流速也是零,管内中心的流速仍然最大,但速度分布不再是抛物线状,其曲线顶端稍宽,且较为平坦。紊流程度越高,曲线的顶端越平坦。在十分稳定的紊流时,平均速度约为管中心速度的 80%。

在紊流时,管壁处的流速为零,靠近管壁处的速度很小,流体质点在这里仍是直线运动,处于层流状态,该层称为层流底层,其厚度用 δ 表示(见图 1-11)。在层流底层与紊流区之间还有过渡层。

实验表明,流体流动的形态与流体的密度(ρ)、黏度(μ)、速度(ω)和管径(d)四个物理量组成的无量纲数有关,用 Re 表示,称为雷诺数,即:

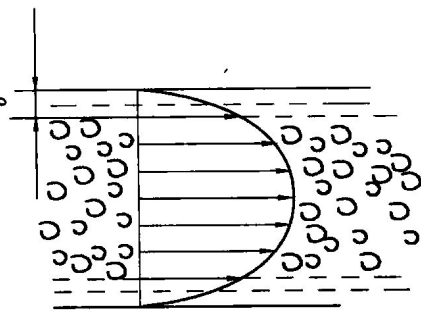


图 1-11 紊流流动

$$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu} \quad (1-14)$$

增大流体流速、密度、管径和减小黏度,将增大 Re 值,易形成紊流。实际测得,在表面光滑的圆管道中,当 $Re < 2300$ 时,流体呈层流流动,当 $Re > 2300$ 时,层流将会失稳,逐渐成为紊流。

对于非圆形管道, d 应为当量直径,它等于 4 倍管道截面积 f 除以周长 s ,即:

$$d = \frac{4f}{s} \quad (1-15)$$

(四) 气体的动能

由物理学知,物体的动能等于 $\frac{1}{2} M \omega^2$,其中 M 为质量, ω 为速度。对于密度为 ρ 的单位体积的气体,其所具有的动能 E_d 为:

$$E_d = \frac{1}{2} \rho \omega^2 \quad (1-16)$$

管道内流动着的单位体积气体相对于管外空气所具有的动能,亦即管内外两种气体的动能差,称为该气体的动压头,对加热炉的情况来说,炉外空气可认为是静止的,其动能为零,故炉气所具有的动压头实际上等于炉气所具有的动能,用 h_d 表示,则:

$$h_d = \frac{1}{2} \rho \omega^2 \quad (1-17)$$

(五) 稳定流动与不稳定流动

稳定流动是指气体流动时,在任一空间点的物理量(如压力、速度、密度)都不随时间而变化(不同点上的物理量可以不相同),若这些物理量随时间而变化,则称为不稳定流动。

加热炉在生产使用中,多数气体流动可近似地看成是稳定流动,少数情况是非稳定流动,如炉门刚开启时的溢气便属于不稳定流动。

二、气体流动时的能量损失

炉气在炉膛、烟道等通道内流动时会由于流体与通道壁的摩擦和碰撞而造成能量损失,或称压头损失。

(一) 摩擦能量损失 h_f

摩擦能量损失指气体在管径不变的直管中流动时产生的能量损失。摩擦能量损失的大小与管长、流体的动能成正比,与管径成反比,即:

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\omega_t^2}{2} \rho_t = \lambda \frac{l}{d} \frac{\omega_0^2}{2} \rho_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right) \quad (1-18)$$

式中 λ 为摩擦阻力系数,在一般加热炉计算时,对砖砌管道 $\lambda = 0.05$,对光滑金属管道 $\lambda = 0.03$; l 为管道长度; d 为管道当量直径。

(二) 局部能量损失

局部能量损失指由局部阻力引起的能量损失,即由于管路突然转向或截面积变化而改变了气流运动的方向或速度大小,从而引起气流内各质点间的相互冲击和形成旋涡而造成的该局部区域的能量损失。局部能量损失与流体动能成正比,即:

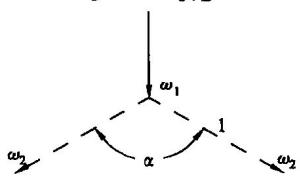
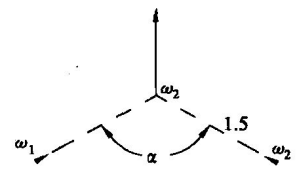
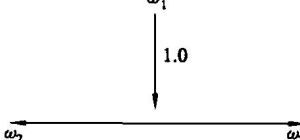
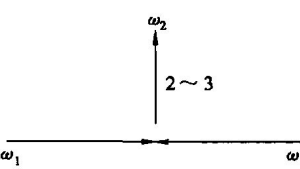
$$h_{\text{pat}} = \xi \frac{\omega_0^2}{2} \rho_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right) \quad (1-19)$$

式中 ξ 为局部阻力系数,其值取决于管道形状和尺寸的变化情况,一般由实验求得,可查表 1-1。为减小局部能量损失,管道应采用圆滑转弯,逐渐扩大和逐渐缩小等措施。

表 1-1 局部阻力系数

阻力种类	ξ 值	公式中用的速度	说 明
突然扩大	$\left(1 - \frac{F_{\text{小}}}{F_{\text{大}}} \right)^2$	ω 小管	F 为管道截面积, ω 为流速
逐渐扩大	$\left(1 - \frac{F_{\text{小}}}{F_{\text{大}}} \right)^2 \sin \alpha$	ω 小管	α 为扩大部分两条边组成的夹角
突然缩小	$0.5 \left[1 - \left(\frac{F_{\text{小}}}{F_{\text{大}}} \right)^2 \right]$	ω 小管	
烟道闸门	$\left(\frac{F_{\text{大}}}{0.7 F_{\text{小}}} - 1 \right)^2$	ω 大管	
圆滑边缘的小孔 进口	0.5	ω_1	

续表 1-1

阻力种类	ξ 值	公式中用的速度	说 明
急转弯 90°	0.8~1.2	$\omega_1 = \omega_2$	矩形管道用大数值, 圆形或方形管道用小数值
急转弯 45°	0.25~0.35	$\omega_1 = \omega_2$	
圆滑转弯 90°	$\frac{r}{d}$ ξ 1 0.6 1.5 0.4 3 0.3 5 0.2		r 为曲率半径; d 为管道直径 光滑管道数值较此小 40%~50%
$\alpha = 90^\circ$ 分支		$\omega_1 = \omega_2$	所有 ω_1 为进口流速; ω_2 为出口流速
$\alpha = 90^\circ$ 合流		$\omega_1 = \omega_2$	
180° 分支		$\omega_1 = \omega_2$	在实际安装管路时, 往往 $\omega_1 \neq \omega_2$, 且分支或合流的角度及位置不同, 其局部阻力系数可参考有关资料
180° 合流		$\omega_1 = \omega_2$	

三、气体流动的连续性方程式

在图 1-12 中, 设气体在管道中作稳定流动, 根据质量守恒定律, 单位时间内流入的气体质量等于流出的气体质量, 即: 单位时间流经管道任一截面的气体质量恒定。设单位时间内通过 I, II 两截面的气体质量分别为 $\omega_1 f_1 \rho_1$ 和 $\omega_2 f_2 \rho_2$, 则有:

$$\omega_1 f_1 \rho_1 = \omega_2 f_2 \rho_2 \quad (1-20)$$

此式即为气体流动的连续性方程式。对于不可压缩气体, $\rho_1 = \rho_2$, 则:

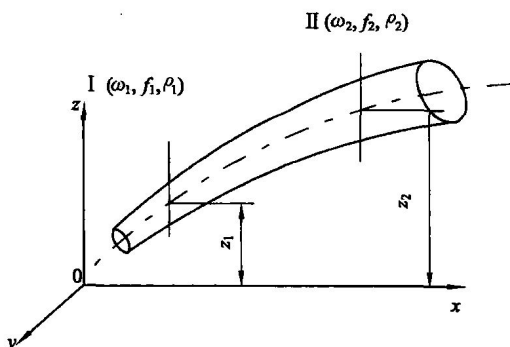


图 1-12 气流的连续性