



高职高专“十一五”规划教材

冶金炉

热工基础辅导教程

YEJINLU REGONG JICHU FUDAO JIAOCHENG

王厚山 主编

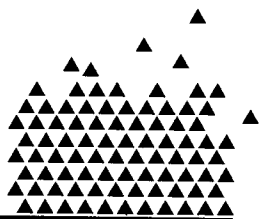
王玉玲 主审



化学工业出版社



高职高专“十一五”规划教材



冶金炉

热工基础辅导教程

YEJINLU REGONG JICHU FUDAO JIAOCHENG

王厚山 主 编
张 花 王鸿雁 副主编
王玉玲 主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是高职高专冶金技术、材料成型与控制技术专业的教学辅导用书,全书分为7部分,即绪论、气体力学原理、燃料及燃烧、传热原理、耐火材料、冶金炉热能的合理利用、复习题和模拟题。主要围绕冶金生产中炉内气体流动、燃料燃烧、热量传递、耐火材料以及冶金炉热能的合理应用五个方面进行编写,本书注重理论联系实际、能源节约、清洁及可持续发展等时代特征,指导性较强,并且在内容中列举了大量的实例,在结构上设置了学习指南、例题分析、习题解答和复习思考题解答。其中,学习指南、例题分析是本书的重点。便于读者更好地学习,掌握其核心内容。

本书除作为高职高专教材外,也可供中等职业学校相关专业作教学参考书,同时,还可作企业职工培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

冶金炉热工基础辅导教程/王厚山主编. —北京:化学工业出版社, 2009.9
高职高专“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-06303-8

I. 冶… II. 王… III. 冶金炉-热工学-高等学校: 技术学院-教学参考资料 IV. TF061.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 119890 号

责任编辑:高钰
责任校对:徐贞珍

文字编辑:李娜
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印装:化学工业出版社印刷厂
787mm×1092mm 1/16 印张10¼ 字数256千字 2009年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:20.00 元

版权所有 违者必究

前 言

冶金炉热工基础课程是冶金类专业学生必修的一门专业基础课。它为专业课程的学习打下理论基础,同时也是培养学生分析测试技能的课程。通过这门课程的学习,可以学会对热工中一些基本问题的思考方法,培养解决实际问题时必须具备的一些基本概念和思路。但对初学者来说,感觉它的基本概念和公式比较多,而且每个公式又有各种限制条件,做习题时往往感到无从下手,因而认为冶金炉热工基础比较难学。编者在多年的教学实践中,深深感到要使读者学习简单,能独立地多做一些习题,提高解题能力是很重要的步骤。也就是说,要使理论联系实际,即用冶金炉热工基础的观点和方法来考虑和解决实际问题,提高解题能力是第一步的工作。

本书是配合王鸿雁主编的《冶金炉热工基础》而编写的一本学习解题指导,目的是为了帮助学习者提高学习与解题能力,也为了方便在独立解题以后的自我检验,特别是针对社会上广大的自学者的需要。因此本书的每一章大都由四个部分构成:学习指南,例题分析,习题解答,复习思考题解答。其中第一、二部分是本书的重点,通过学习指南和例题分析,让读者系统掌握学习内容,并阐明了解题思路和方法。我们希望这种编写方式能对提高读者的解题能力有所裨益。

在编写本书的过程中,对某些很好的问题由于篇幅所限,不得不忍痛割爱。对一些思考题,如果思考的角度不同,如直接从实践角度来思考,则有可能使答案不唯一,书中提供的答案只能说是参考性的,有些方面可能没有涉及。我们恳切地盼望广大读者能提出宝贵意见,供再版时修订。

本教材由山东工业职业学院王厚山担任主编,张花、王鸿雁担任副主编,山东铝业职业学院王玉玲主审。第1章、第4章由王厚山编写,绪论、第2章由张花编写,第3章由王鸿雁编写,第5章由张店钢铁总厂李明福编写,复习题及其参考答案和附录由卢立娟编写,模拟题及其参考答案由孙亚南编写,全书由王厚山统稿。

本书除作为高职高专教材外,也可供中等职业学校相关专业作教学参考书,同时,也可作企业职工培训用书。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中不妥与疏漏之处恳请广大读者给予批评指正。

编 者
2009年4月

目 录

绪论	1
1 气体力学原理	3
1.1 学习指南	3
1.2 例题分析	12
1.3 习题解答	25
1.4 复习思考题解答	36
2 燃料及燃烧	40
2.1 学习指南	40
2.2 例题分析	50
2.3 习题解答	60
2.4 复习思考题解答	63
3 传热原理	68
3.1 学习指南	68
3.2 例题分析	80
3.3 习题解答	85
3.4 复习思考题解答	96
4 耐火材料	102
4.1 学习指南	102
4.2 复习思考题解答	108
5 冶金炉热能的合理利用	114
5.1 学习指南	114
5.2 复习思考题解答	117
复习题一	120
复习题一参考答案	124
复习题二	127
复习题二参考答案	133
模拟题一	136
模拟题一参考答案	138
模拟题二	140
模拟题二参考答案	142
模拟题三	145
模拟题三参考答案	147
附录	150
参考文献	160

绪 论

【课程目标】

“冶金炉热工基础”课程是冶金类专业学生必修的一门专业基础课。它为专业课程的学习打下理论基础，同时也是培养学生分析测试技能的课程。本着高职课程理论以“够用”为度、突出技能的原则，本课程教学过程中注意强调理论联系实际。

课程的主要任务是使学生掌握一定的流体力学知识、压缩性气体的流出的基本规律、燃料燃烧知识以及传热知识，培养学生运用这些知识分析和解决问题的能力，为后续专业课学习打好基础，也为今后进一步提高和从事冶金工程技术工作创造良好条件。

【知识能力结构】

(1) 知识结构

- ① 流体“力”、“能”基本知识；
- ② 流体流动阻力基本知识；
- ③ 压缩性气体流出的基本规律；
- ④ 燃烧基本知识；
- ⑤ 燃料性能基本知识；
- ⑥ 传导传热及其控制知识；
- ⑦ 对流传热及其控制知识；
- ⑧ 辐射传热及其控制知识；
- ⑨ 各种耐火材料的主要性能；
- ⑩ 冶金炉热能的基本知识。

(2) 能力结构

- ① 流体参数测定能力；
- ② 运用流体静力学方程、流体连续性方程、流体动力学方程分析处理热工现象的能力；
- ③ 烟囱设计计算能力、风机与泵选择使用能力；
- ④ 根据冶金生产工艺选择、使用燃料的能力；
- ⑤ 燃烧参数控制能力；
- ⑥ 燃料热值测定能力；
- ⑦ 煤成分分析能力；
- ⑧ 烟气成分分析、设备漏气判定能力；
- ⑨ 根据黑体颜色估计其温度的能力；
- ⑩ 合理选用耐火材料的能力；
- ⑪ 冶金炉燃料的合理利用、节约燃料的途径和余热利用。

(3) 素质

- ① 培养学生认真负责的工作态度和严谨细致的工作作风；

- ② 培养学生的自主学习意识和自学能力；
- ③ 培养学生的创新意识与创造能力；
- ④ 培养学生的团结、合作精神。

【课程主要内容】

(1) 理论教学

① 流体力学基础知识：流体的物理性质、流体静力学基础知识、流体动力学基础知识、流体流动时的阻力及管路计算。

② 流体力学在冶金工业中的应用基本知识：

烟囱、喷射器、离心风机与回转风机、离心泵与回转泵。

③ 燃料及燃烧基本知识：冶金工业燃料的要求及分类、燃料的主要性质、燃料各种基准的换算及燃烧计算、固体燃料燃烧过程、气体燃料燃烧过程及燃烧设备、液体燃料燃烧过程及燃烧设备。

④ 传热学基本知识：传热的基本概念、传导传热、对流传热、辐射传热、气体辐射、综合传热。

⑤ 耐火材料基本知识：各种耐火材料的主要性能。

⑥ 冶金炉热能的基本知识：冶金炉燃料的合理利用、节约燃料的途径、余热利用。

(2) 技能训练

① 课内实验：训练测定技能。

② 课程设计：训练设计基本能力、工程图绘制能力、物料平衡与热平衡计算能力。

③ 生产实习、岗前实训。

训练以下基本能力：

流体流速、流量、压力测定能力；

分析冶金炉中流体流动、传热的能力；

根据火焰、窑体颜色等估计温度、窑压的能力；

燃料选择、使用与控制的能力；

耐火材料选用的能力；

冶金炉热能的合理利用的能力。

【建议教学方法】

- ① 本课程按讲课、练习、实践、实训和辅导五个环节进行；
- ② 讲课贯彻“少而精”的原则，注意精讲多练，讲练结合；
- ③ 注意将分析生产、生活中常见的热工现象与热工理论相结合；
- ④ 积极采用现代教育手段，努力提高教学质量。

1 气体力学原理

1.1 学习指南

【学习目标】

了解气体的各种性质、气体流动的状态、运动气体的能量、各种压头损失等基本概念；掌握气体平衡方程式、运动气体的连续方程式与柏努利方程式的应用，以及气体在流动过程中各种压头损失的计算。

【学习要求】

- ① 掌握绝对压力和表压力的关系。
- ② 掌握气体绝对压力和表压力的变化规律。
- ③ 理解黏度的概念及管内流型、雷诺数和边界层。
- ④ 理解流量、流速的概念及流量、流速与温度和压力的关系。
- ⑤ 理解气体能量的种类及概念。
- ⑥ 掌握连续性方程的含义及应用。
- ⑦ 掌握柏努利方程的含义及应用。
- ⑧ 了解摩擦阻力和局部阻力的概念并会查表计算。
- ⑨ 理解烟囱的工作原理。
- ⑩ 掌握烟囱的热工计算。
- ⑪ 了解风机的工作原理和风机的性能。
- ⑫ 理解压缩性气体流出的基本规律。
- ⑬ 了解炉内气体流动。

【课程重点】

- ① 连续性方程的含义及应用。
- ② 柏努利方程的含义及应用。
- ③ 流体的黏性。
- ④ 烟囱的工作原理及热工计算。
- ⑤ 炉内气体流动。

【课程难点】

- ① 流体的黏性及边界层。
- ② 连续性方程和柏努利方程的应用。
- ③ 风机的性能。
- ④ 炉内气体流动。

1.1.1 气体的物理性质

- (1) 气体的温度

1 气体力学原理

绝对温标与摄氏温标的关系 $T=273+t$ (K)

气体在运动过程中有温度变化时, 气体的平均温度为

$$t_{\text{均}} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (^\circ\text{C})$$

(2) 气体的压力

① 气体的压力与温度的关系 $P_t = P_0(1 + \beta t)$

② 绝对压力和表压力 以真空为起点所计算的气体压力称为绝对压力, 通常以符号 $P_{\text{绝}}$ 表示。设备内气体的绝对压力与设备外相同高度的实际大气压的差称为气体的表压力, 常以符号 $P_{\text{表}}$ 表示。表压力和绝对压力的关系为

$$P_{\text{表}} = P_{\text{绝}} - P_{\text{大气}}$$

当气体的表压为负值时, 称此气体的表压为负压, 负压那部分的数值, 称为真空度。真空度与绝对压力的关系

$$P_{\text{真}} = P_{\text{大气}} - P_{\text{绝}}$$

(3) 气体的体积

气体体积随温度和压力的不同有较大的变化, 用公式表示 $V_t = V_0(1 + \beta t)$ (m^3)

(4) 理想气体状态方程式

$$PV = nRT$$

(5) 气体的密度

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg}/\text{m}^3)$$

混合气体在标准状态下的密度

$$\rho_{\text{混}} = \rho_1 a_1 + \rho_2 a_2 + \cdots + \rho_n a_n \quad (\text{kg}/\text{m}^3)$$

1.1.2 静力学基本定律

(1) 阿基米德原理

$$h = Hg(\rho' - \rho)$$

单位面积上气柱所具有的上升力决定于气柱之高度和冷、热气体的密度差。

(2) 气体平衡方程式

① 气体绝对压力的变化规律 $P_1 = P_2 + Hg\rho$

静止气体沿高度方向上绝对压力的变化规律是下部气体的绝对压力大于上部气体的绝对压力, 上下两点间的绝对压力差等于此两点间的高度差乘以气体在实际状态下的平均密度与重力加速度之积。

② 气体表压力的变化规律 $P_{\text{表}_2} - P_{\text{表}_1} = Hg(\rho - \rho')$ 或 $P_{\text{表}_2} = P_{\text{表}_1} + Hg(\rho - \rho')$

当气体密度 ρ 小于大气密度 ρ' (热气体皆如此) 时, 静止气体沿高度方向上, 表压力的变化是上部气体的表压力大于下部气体的表压力, 上下两点间的表压力差等于此两点间的高度差乘以大气与气体的实际密度差与重力加速度之积。此两点间的表压差等于气柱的上升力。

1.1.3 气体流动的动力学

(1) 流体流动的状态

① 气体的黏性 流速不同的相邻气层间就会发生能量 (动量) 交换, 较快的一层将显示一种力带动较慢的一层向前移动, 较慢的一层则显示出一个大小相等方向相反的力阻止较

快的一层前进。这种体现在气体流动时使两相邻气层的流速趋向一致,且大小相等方向相反的力,称为内摩擦力或黏性力。气体作相对运动时产生内摩擦力的这种性质称为气体的内摩擦或黏性。

$$F_{\text{黏}} = \mu \frac{d\omega}{dy} f$$

② 稳定流动和不稳定流动 所谓稳定流动指的是流体中任意一点上的物理量不随时间改变的流动过程。

③ 管内流型及雷诺数 气体在流动时有两种截然不同的流动情况,即层流和紊流。

a. 层流:当气体流速较小时,各气体质点平行流动,此种流动称为层流。特点:由于气体在管道中流动时,管壁表面对气体有吸附和摩擦作用,管壁上总附有一层薄的气体,此种气体称为边界层;在层流情况下管道内气流速度是按抛物线分布的。

b. 紊流:当气流速度较大时,各气流质点不仅沿着气流前进方向流动,而且在各个方向作无规则的杂乱曲线运动,通常称为紊流。在紊流情况下主流内形成许多细小的漩涡,故又称涡流。

c. 层流与紊流的判别和雷诺数。

紊流的形成与下列因素有关。

气流速度 (ω_t): ω_t 越大,越易形成紊流。

气体密度 (ρ_t): ρ_t 愈大,气体质点横向运动的惯性愈大,愈易形成紊流。

管道直径 (d): d 越大,管壁对中心气流的摩擦作用越小,越易形成紊流。

气体黏性 (μ_t): μ_t 越小,产生的内摩擦力越小,越易形成紊流。

气体在管道内的流动情况决定于雷诺数

$$Re = \frac{\omega_t d_{\text{当}} \rho_t}{\mu_t} \text{ 或 } Re = \frac{\omega_t d_{\text{当}}}{\gamma_t}$$

$$d_{\text{当}} = \frac{4 \times \text{管道截面积}}{\text{管道截面周长}} = \frac{4f}{s} \quad (\text{m})$$

当气体在光滑管道中流动时, $Re < 2300$ 时为层流, $Re > 10000$ 时为紊流; $2300 < Re < 10000$ 时为过渡区。在过渡区内,可能呈现层流,但也可能呈现紊流。 $Re_{\text{临}} = 2300$ 是判别气体流动状态的标志。

d. 边界层:边界层又称附面层,它指的是流动着的黏性气体(或液体)与固体表面接触时,由于流层与壁面的摩擦作用便在固体表面附近形成速度变化的区域。

(2) 运动气体的连续方程

① 流速 流速随温度的变化关系为 $\omega_t = \omega_0 (1 + \beta t)$ (m/s)

② 流量 单位时间内气体流过某截面的数量称为流量。流量是表示气体流动数量多少的物理参数。

体积流量 $V_0 = \omega_0 f$ (m³/s) $V_t = \omega_0 (1 + \beta t) f$ (m³/s) $V_t = \omega_t f$ (m³/s)

质量流量 $M = V_0 \rho_0 = \omega_0 f \rho_0$ (kg/s)

连续方程式 $V_1 \rho_1 = V_2 \rho_2$ $\omega_1 f_1 \rho_1 = \omega_2 f_2 \rho_2$

如果气体在流动过程中的密度保持不变 $\omega_1 f_1 = \omega_2 f_2$

低压气体在稳定流动时,若流量固定,气体的流速与管道的截面积成反比。当管道截面积一定时,气体在管内的流速与流量成正比。

(3) 气体的能量

① 位压和位压头 单位体积气体具有的位能称为位压。

$$\text{位压} = \frac{\text{气块位能}}{\text{气块体积}} = \frac{H g \rho dV}{dV} = H g \rho \quad (\text{Pa})$$

管内气体位压与管外同高度上大气的位压的差值,称为管内气体的相对位压或简称位压头,用符号 $h_{\text{位}}$ 表示,单位是 Pa。

$$h_{\text{位}} = H g (\rho - \rho') \quad (\text{Pa})$$

气体某处的位压头等于该处距基准面的高度 $H(\text{m})$ 与重力加速度 $g(\text{m/s}^2)$ 之乘积,再乘以气体与大气的密度差 $(\rho - \rho')\text{kg/m}^3$ 。

② 静压和静压头 单位体积气体具有的压力能称为静压。

$$\text{静压} = \frac{\text{气块压力能}}{\text{气块体积}} = \frac{P dV}{dV} = P \quad (\text{Pa})$$

管道内气体的静压与管道外同高度上大气的静压之差值称为相对静压或简称静压头,用符号 $h_{\text{静}}$ 表示,单位是 Pa。

$$h_{\text{静}} = P - P' \quad (\text{Pa})$$

气体的静压头是单位体积气体所具有的相对静压。其数值等于管道内外气体所具有的相对压力(即表压力)。

气体的静压与气体的绝对压力,二者的物理意义不同。前者是指单位体积气体具有的内能,后者是指单位面积气体具有的内力,但二者在数值上相等,故常混用。同样,气体的静压头与气体的表压力,二者的物理意义亦不同,但二者在数值上相等,故亦常混用。

③ 动压和动压头 单位体积气体具有的动能称为动压。因此,气块亦即 f 面处气体的动压为

$$\text{动压} = \frac{\text{气块动能}}{\text{气块体积}} = \frac{\frac{\omega^2}{2} \rho dV}{dV} = \frac{\omega^2}{2} \rho \quad (\text{Pa})$$

管道内气体的动压与管道外同高度上大气的动压之差值称为相对动压或简称动压头,用符号 $h_{\text{动}}$ 表示,单位是 Pa。

$$h_{\text{动}} = \frac{\omega^2}{2} \rho \quad (\text{Pa}) \quad h_{\text{动}} = \frac{\omega^2}{2} \rho_0 (1 + \beta t) \quad (\text{Pa})$$

(4) 柏努利方程式

$$\text{① 理想气体的柏努利方程式} \quad P_1 + H_1 g \rho + \frac{\omega_1^2}{2} \rho = P_2 + H_2 g \rho + \frac{\omega_2^2}{2} \rho$$

密度 ρ 不变的理想气体在稳定流动中各截面的单位体积气体的总能量(即静压、位压和动压之和)相等。

$$\text{② 实际气体的柏努利方程式} \quad P_1 + H_1 g \rho + \frac{\omega_1^2}{2} \rho = P_2 + H_2 g \rho + \frac{\omega_2^2}{2} \rho + h_{\text{失}}$$

低压气体在稳定流动中,前一截面的总压(静压、位压、动压之和)等于后一截面的总压(静压、位压、动压、能量损失之和)。而各种能量间可相互转变,各种能量都可直接或间接地消耗于能量损失,在能量转变和能量损失过程中静压不断变化。

③ 在大气作用下的柏努利方程式

$$\begin{aligned} h_{\text{静}_1} + h_{\text{位}_1} + h_{\text{动}_1} &= h_{\text{静}_2} + h_{\text{位}_2} + h_{\text{动}_2} + h_{\text{失}} \\ (P_1 - P'_1) + H_1 g (\rho - \rho') + \frac{\omega_1^2}{2} \rho &= (P_2 - P'_2) + H_2 g (\rho - \rho') + \frac{\omega_2^2}{2} \rho + h_{\text{失}} \end{aligned}$$

气体在流动过程中各压头间可相互转变，各压头都可直接或间接地消耗于能量损失。

a. 各种压头可相互转变，但只有动压头才能直接变为压头损失，消耗的动压头则由静压头补充。

b. 气体在管道中稳定流动时，动压头变化取决于管道截面及气体温度。截面不变的等温流动，动压头不变，截面变化或变温流动，动压头会变。动压头的变化会直接引起静压头的变化。

c. 位压头的变化取决于高度和温度（密度）的变化。等温的水平流动，位压头不变，高度变化或变温流动时，位压头会变。位压头的变化也会直接影响静压头的变化。

d. 压头损失和压头转变是不同的，压头转变是可逆的，而压头损失已变为热散失掉，是不可逆的。

1.1.4 压头损失与气体输送

(1) 压头损失

压头损失包括摩擦损失和局部损失两类不同性质的损失。

① 摩擦阻力的损失 因摩擦作用而引起的能量损失称为摩擦阻力损失或摩擦压头损失，常用符号 $h_{\text{摩}}$ 表示。

摩擦阻力损失 $h_{\text{摩}}$ 与下列因素有关：气体动压头、管道长度 L 与管道直径 D 、流体流动的性质

$$h_{\text{摩}} = \xi \frac{L}{D} \times \frac{\omega^2}{2} \rho \text{ (Pa)} \quad \text{或} \quad h_{\text{摩}} = \xi \frac{L}{D} \times \frac{\omega_0^2}{2} \rho_0 (1 + \beta t) \text{ (Pa)}$$

$$\text{层流时} \quad \xi = \frac{64}{Re^n}$$

$$\text{紊流时} \quad \xi = \frac{A}{Re^n}$$

$$\text{如果管道内气体表压超过 } 9810 \text{ Pa 的高压时} \quad h_{\text{摩}} = \xi \frac{L}{D} \times \frac{\omega^2}{2} \rho \frac{P_0}{P} \text{ (Pa)}$$

$$\sum h_{\text{摩}} = h_{\text{摩}1} + h_{\text{摩}2} + \cdots + h_{\text{摩}n} \text{ (Pa)}$$

② 局部阻力损失 气体在管道中流动时，由于管道形状改变（如突然扩张或突然收缩）和方向改变（如 90° 转弯等），气体分子间的相互碰撞和气体分子与器壁间的碰撞而引起的压头损失，称为局部阻力损失，常用符号 $h_{\text{局}}$ 表示。

$$h_{\text{局}} = K \frac{\omega^2}{2} \rho \text{ (Pa)} \quad \text{或} \quad h_{\text{局}} = K \frac{\omega_0^2}{2} \rho_0 (1 + \beta t) \text{ (Pa)}$$

③ 负位压头引起的压头损失 热气体的位压头是一种促使气体上升的力，当管道中的气体由上向下流动时，位压头就成了气体流动的一种阻力，这时的位压头称负位压头，用符号 $h_{\text{位负}}$ 表示。

$$\text{④ 气体通过管束时的压头损失} \quad h_{\text{局}} = K \frac{\omega_0^2}{2} \rho_0 (1 + \beta t) \text{ (Pa)}$$

$$K_{\text{直}} = n \frac{s}{b} \alpha + \beta$$

$$K_{\text{错}} = (0.7 \sim 0.8) K_{\text{直}}$$

⑤ 气体通过散料层的压头损失

$$h_{\text{失}} = \alpha \frac{\omega_0^2}{2\varepsilon^2} \rho_0 (1 + \beta t) \frac{H}{d}$$

⑥ 减少总压头损失的措施：选取适当的流速、力求缩短设备长度、力求减少设备的局部变化。

当必须有局部变化时，也应采用如下措施：

用断面的逐渐变化替代断面的突然变化可减少 $h_{\text{局}}$ ；

用圆滑转弯代替直转弯或用折转弯代替直转弯可减少 $h_{\text{局}}$ ；

非生产需要时不宜过大的关闭闸板和阀门，这样也可减少 $h_{\text{局}}$ 。

(2) 烟囱排烟

① 烟囱的工作原理 烟囱底部热气体具有位压头，促使气体向上流动，这样烟囱底部就呈现负压，而炉尾烟气的压力比烟囱底部压力大，因而热的烟气会自炉尾流至烟囱底部，并经烟囱排至大气中。

$$-\Delta P_1 = Hg(\rho' - \rho) - \left(\frac{\omega_2^2}{2} \rho_2 - \frac{\omega_1^2}{2} \rho_1 \right) - \xi \frac{\omega_{\text{均}}^2}{2} \rho \frac{H}{d_{\text{均}}} \quad (\text{Pa})$$

烟囱的抽力主要取决于位压头的大小，即主要取决于烟囱高度、烟气温度和空气温度。烟囱愈高，烟气温度愈高时，则抽力愈大，当空气温度愈高时， ρ' 减小，抽力则减小。

② 烟囱计算

a. 烟囱直径的确认

$$\text{顶部出口直径 } (d_2) \quad d_2 = \sqrt{\frac{4V_0}{\pi\omega_{02}}} \quad (\text{m})$$

底部直径 (d_1)：铁烟囱，上下直径相同；对于砖砌和混凝土烟囱， $d_1 = 1.5d_2$ 。

$$\text{b. 烟囱高度的确定} \quad H = \frac{1}{g(\rho' - \rho)} (h_{\text{抽}} + \Delta h_{\text{动}} + h_{\text{摩}})$$

确定烟囱的抽力 $h_{\text{抽}}$ $h_{\text{抽}} = (1.2 \sim 1.3) h_{\text{失}}$

$$h_{\text{摩}} \text{ 的计算} \quad h_{\text{摩}} = \xi \frac{\omega_{0\text{均}}^2}{2} \rho (1 + \beta t_{\text{均}}) \frac{H}{d_{\text{均}}}$$

$$\text{c. 计算动压头增量 } \Delta h_{\text{动}} \quad \Delta h_{\text{动}} = \frac{\omega_{02}^2}{2} \rho_0 (1 + \beta t_2) - \frac{\omega_{01}^2}{2} \rho_0 (1 + \beta t_1)$$

$$\text{d. 计算 } (\rho' - \rho) \quad \rho' = \frac{\rho_0'}{1 + \beta t_{\text{均}}} \quad \rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta t_{\text{均}}}$$

在设计烟囱时，还必须注意下列几点：

考虑环境卫生和对生物的影响；

为了建筑的方便，烟囱的出口直径应不小于 800mm；

当几个炉子合用一个烟囱时，烟囱所需抽力只需按阻力最大的那个炉子计算烟囱高度，但在计算烟囱直径时，应以几个炉子烟气量之和进行计算。

(3) 炉子的供气系统

① 供气管道

a. 供气管道的布置原则。

为了减少管道内的压头损失，在满足生产需要的情况下应力求缩短管道长度。

为了减少管道内的压头损失，在满足生产需要的情况下应力求减少管道的局部变化。在必须有局部变化时也应尽量用断面的逐渐变化代替突然变化，用圆滑转弯或折转弯代替直

转弯。

为了不使管道内有较大的静压头降低,在满足生产需要的情况下应不使管道有较大的动压头增量。这样,分支管道内的气体流速则不宜大于或不宜很大于总管道内的气体流速。

为了不使管道内有较大的静压头降低,在满足生产需要的情况下,应力求使热气自下而上流动。

为了保证分支管道内有均匀的气流分配,分支管道内采取对称布置,并在管道上设置闸门等调节装置。

$$b. \text{ 供气管道的断面尺寸 } f_{\text{总}} = \frac{(1.2 \sim 1.3)V_0}{3600\omega_0} (\text{m}^2) \quad f_{\text{支}} = \frac{f_{\text{总}}}{n} (\text{m}^2)$$

c. 供气管道内的压头损失

$$h_{\text{失}} = \sum_1^n \left(\xi \frac{L}{d} + \sum K \right) \frac{\omega^2}{2} \rho (\text{Pa}) \text{ 或 } h_{\text{失}} = \sum_1^n \left(\xi \frac{L}{d} + \sum K \right) \frac{\omega_0^2}{2} \rho_0 (1 + \beta t) (\text{Pa})$$

当管道不对称分布时,可采取如下措施:使分支管道具有不同的直径。当管道不对称布置时,使较短支管具有较小管径,使较长支管具有较大管径;在支管道上安置阀门。

$$d. \text{ 管道的特性方程式 } h_{\text{失}} = kV^2 (\text{Pa}) \quad h_{\text{失}} = h_z + kV^2 (\text{Pa})$$

② 供气设备

a. 风机:风机可以向炉子供应空气或其他气体,也可作为抽烟机排出炉子产生的烟气。风机作为供风设备的基本作用是使具有一定风量和风压的空气经供风管道供入炉前的气体喷出设备(烧嘴、喷嘴、风扇等),以保证炉子对空气的要求。

风机的风压通常是指风机的全风压(风机出口的静压头与动压头之和),用符号 h 表示,单位是 Pa。

b. 风机的工作原理和风机的性能。叶片轮转动后则将空间大气不断从吸入口吸入,并使之具有一定的动压头。由于离心力的作用,被吸入的空气又不断地被叶片轮甩向机壳空间,并在机壳的扩张形空间内进行由动压头向静压头的转变。由风机出口出去的空气量为风机的风量,由风机出口出去的静压头与动压头的总和为风机的全风压或简称风压。

$$N_{\text{效}} = Vh (\text{Nm/s}) \text{ 或 } (W) \quad N_{\text{效}} = \frac{Vh}{1000} (\text{kW})$$

$$N = \frac{N_{\text{效}}}{\eta} = \frac{Vh}{1000\eta} (\text{kW})$$

c. 风机的选择应注意以下几点:

风机铭牌上标出的风压、风量和功率是指在效率最高时的全风压、风量和功率;

风机性能表中特性曲线或产品铭牌上标出的风机性能,都是在进风口空气温度为 20°C , 压力为 101325Pa (1 个大气压), 空气密度为 1.2kg/m^3 条件下提出的数值(这些条件称之为风机实验的标准状态)。

$$\text{换算的方法如下: } V_1 = V \frac{101325}{P} \times \frac{273+t}{273} (\text{m}^3/\text{h}) \quad h_1 = h \frac{101325}{P} \times \frac{273+t}{293} (\text{Pa})$$

$$\text{风机实际功率} \quad N = N_1 \frac{P}{101325} \times \frac{293}{273+t} (\text{kW})$$

当风机转数 n 与设计(实验)转数 n_1 不同时,或者人为地改变风机的转数,风机特性曲线应进行换算

$$\frac{V}{V_1} = \frac{n}{n_1} \quad \frac{h}{h_1} = \left(\frac{n}{n_1} \right)^2 \times \frac{\rho}{\rho_1} \quad \frac{N}{N_1} = \left(\frac{n}{n_1} \right)^3 \times \frac{\rho}{\rho_1}$$

式中符号的角标“1”指的是风机实验标准状态。

d. 风机的工况调节。一种方法是在送气管道上设置节流闸阀, 改变闸阀开启度以调节风量。另一种方法是改变风机转数。再一种方法是在风机吸风管上装置节流闸阀, 用改变风机性能曲线的方法来调节风量和风压, 这是最简单又适用的方法。

e. 风机的并联和串联。风机并联的好处是得到较大风量, 但小于各台风机单独使用时送风量的总和, 风机效率有所降低; 风机串联时, 风量不变, 风压有所增加, 但小于各台风机单独工作时风压之和, 串联时效率很低, 而且使风机寿命降低。

(4) 喷射器

喷射器的作用原理是利用一种喷射介质(空气或蒸汽), 经小孔喷出, 产生一高速气流, 使附近的静压降低, 来吸取气体。喷射介质和吸入的气体混合后由扩张管送出。扩张管的作用是将部分动压头转变为静压头, 以利送出。

1.1.5 压缩性气体的流出

(1) 压缩性气体流出的基本规律

① 压力的变化规律 流股中的压力在流动过程中逐渐降低, 而流股中任意点的压力 P 都介于原始压力 P_1 和周围介质压力 P_0 之间, 亦即任意点压力 P 与原始压力 P_1 之比值 $\frac{P}{P_1}$ 为小于 1 的数值。此为流股中压力变化的定性规律。

② 密度和比容的变化规律 气体压力在流动过程中逐渐降低, 气体比容在流动过程中逐渐增高, 气体密度在流动过程中逐渐降低。此为气体比容和气体密度在流动过程中的定性变化规律。

③ 温度的变化规律 气体的绝对温度在流动过程中也逐渐降低。此为气体温度在流动过程中的定性变化规律。

④ 速度的变化规律 气体流速 ω 在流动过程中逐渐增高。此为气体流速变化的定性规律。

⑤ 流股断面的变化规律 先收缩后扩张是气体内部各物理参数客观变化的综合结果。

(2) 管嘴的设计和计算

① 音速管嘴 临界压力 $P_{\text{界}}$ 恰好等于周围介质压力 P_0 , 时, 流股可保持流股收缩段的完整形状, 管嘴的出口断面就是流股的临界断面, 气体由管嘴出口的喷出速度即为气体的临界速度或音速。因此, 常称这种管嘴为音速管嘴。显然, $P_{\text{界}} = P_0$ 是设计音速管嘴的根据, 采用收缩形管嘴是设计音速管嘴的结果。

② 超音速管嘴 临界压力 $P_{\text{界}}$ 仍大于周围介质压力 P_0 。流股具有全部收缩段和一定的扩张段, 管嘴形状是先收缩后扩张形管嘴。此种管嘴的出口断面大于流股的临界断面, 此种管嘴的气体喷出速度大于流股的临界速度即大于音速。因此, 常称这种管嘴为超音速管嘴(亦称拉伐尔管嘴)。显然, $P_{\text{界}} > P_0$ 是设计超音速管嘴的根据, 先收缩后扩张型管嘴是设计超音速管嘴的结果。

1.1.6 炉内气体流动

(1) 火焰炉内的气体流动

① 位压头作用下的炉气流动

a. 火焰充满炉膛的问题: 把炉顶作成逐渐下降的; 足够的热负荷(足够的炉气流量)

和适当的炉子宽度；把烟道口开在炉底上。

b. 分流定则：在位压头起重要作用的情况下，为了使气流在各通道内分布均匀，必须使逐渐冷却的气体（热气）由上向下流动；逐渐被加热的气体（冷气）由下向上流动。

c. 火焰上浮问题。

② 射流（流股）及射流作用下的炉气流动

a. 自由射流的基本规律。气体由管嘴喷射到一个无限大的空间内，该空间充满了静止的并与喷入气流物理性质相同的介质，这种射流叫自由射流。自由射流的喷出介质与周围介质同时进行动量交换和质量交换，自由射流沿长度方向的动量不变，动能减少，损失的动能转变成了热。靠近静止介质边缘的速度下降较快，而中心的流速下降较慢。气体射流起始直径越大，中心流速的下降越慢。

b. 两自由射流相遇。相交射流分为开始段、过渡段和主段三个不同的区段。射流在垂直方向上压扁，水平方向上展宽，外边界呈曲线形；平行射流（ $\alpha=0$ ）由于没有产生使两射流变形的力，因此汇合射流的边界是直线形；两个动量相等同一轴线的反向射流相碰撞时，射流顺着与开始方向垂直的方向均匀流去。

当不同轴线的反向射流相遇时，在两射流的中间形成强烈的循环区。

c. 同心射流的混合。同心射流根据紊流理论，可以把混合过程看作是可能同时发生分子扩散、脉动扩散和机械涡动三个过程；为了加速同心射流的混合，缩短混合路程的长度（即缩短煤气烧嘴的火焰长度），根据实验研究的结果，找到了下面一些规律和措施：

中心射流轴线上的混合过程，随着外层同心气流的相对速度的增加而加快；

减小中心射流喷口直径有利于气流的混合；

使同心射流具有一定交角，则混合强度增加；

在喷管处安装导向叶片，使内外层气流产生旋转，则混合强度增加。

d. 射流与平面相遇。射流与平面相遇时，由于射流对平面的冲击作用，将发生射流的变形、速度分布的变化，并在表面上产生局部压力，这种一面受限制的射流叫半限制射流。

e. 弯曲管道中射出的射流。由弯曲管道中射出的射流具有重要的特点：一是在射流中有气流的旋转现象，二是射流有偏歪现象。

f. 限制射流的特点。火焰炉内气体流动可以看成是射流在四周为炉墙所包围的限制空间内的流动，这种射流叫做限制射流。

旋涡区的存在对炉子工作带来有害的作用，主要在于：不利于炉内传热过程；旋涡区易于沉渣；由于旋涡区的存在，增加了气流的阻力。

（2）转炉内的气体流动

转炉熔池内搅拌作用的强弱和均匀程度，主要取决于氧气射流对熔池的冲击。具体来说，就是用在熔池中产生的凹坑深度（又称冲击深度）和凹坑面积（又称冲击面积）来衡量，同时也要观察熔池的运动状况。

（3）竖炉内的气体流动

要使竖炉内气流分布均匀，必须遵循以下几点。

① 合理组织炉顶加料，使沿炉子横截面料层阻力大致相等。一般希望较小颗粒停留在边缘而大块料居于中央。并在靠炉壁处适当形成料坡，以便减少气流向边缘发展。

② 用提高风口进风速度的办法，使风口气袋向中心适当扩展，或适当增加料层高度以提高风口前鼓风压力。

③ 炉子宽度应与料层高度（即与鼓风压力）相适应，不能过分加宽。

④ 料层顶面与炉顶之间，应保留一定空间，以维持炉顶断面上气体静压力分布相等，对于大型竖炉，则应沿顶面匀称布置排气管道。

1.2 例题分析

例题 1-1 流体的黏度与哪些因素有关？它们随温度如何变化？为什么？

答：流体的黏度与流体的种类、流体的温度和外界压力有关；液体的黏度随温度的升高而降低，气体的黏度随温度的升高而增大；因为温度升高，液体分子之间的间距增大，分子间的作用力降低，使液体的黏度降低；对于气体，当温度升高时，分子间的热运动加剧，使其黏度增加。

例题 1-2 某点的真空度为 65000Pa，当地大气压为 0.1MPa，该点的绝对压强为多少？

解：绝对压强 $P = 0.1 \times 10^6 - 65000 = 35000$ (Pa)

例题 1-3 静止流体受到哪几种力的作用？

答：静止流体受到的作用力有流体的静压力、流体的重力和液面的压力。

例题 1-4 什么是流体静压力？它有哪些特征？

答：流体静压力是指在相对静止的流体内部以及流体与固体壁面之间的垂直接触面的作用力。其特征有：在静止流体中，任一点的静压强在各个方向上大小相等；流体静压强的方向沿着作用面的内法线方向。

例题 1-5 什么是等压面？等压面的条件是什么？

答：等压面是压强相等的点所组成的平面。等压面的条件有：静止流体；同种流体；连续流体。

例题 1-6 压力表和测压计上测得的压强是绝对压强还是相对压强？

答：压力表和测压计上测得的压强是相对压强。

例题 1-7 流体的层流和紊流各有什么特点？它们的速度分布有什么规律？

答：流体在作层流流动时，流体质点作有规则的平行流动，质点间互不干扰混杂；其速度呈抛物线分布，平均流速为中心速度的 $\frac{1}{2}$ ；流体在作紊流流动时，流体质点作无规则的流动，质点间相互碰撞相互混杂；其速度呈曲线分布，平均流速为 0.82~0.85 倍的中心速度。

例题 1-8 什么是稳定流动和非稳定流动？试举例说明。

答：稳定流动是指流场中任意一点的流体物理参数均不随时间而变化的流动过程，如水从恒定水位水箱中的流出；非稳定流动是指流场中任意一点的流体物理参数均随时间而变化的流动过程，如水从非恒定水位水箱中的流出。

例题 1-9 什么是层流底层？层流底层厚度对传质和传热过程有什么影响？

答：层流底层是指靠近管壁附近，作层流流动的一薄层流体。层流底层厚度将增加传质和传热过程的阻力，加大传质和传热过程难度。

例题 1-10 流体的压头和压力的意义有什么不同？

答：流体的压头和压力是两个不同的概念，流体的压头是指单位流体体积所具有的能量，而流体的压力是指作用在流体表面的流体静压力。

例题 1-11 简述烟囱的工作原理。