

高等学校规划教材
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

传热学

任世铮 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

高等学校规划教材

传 热 学

任世铮 编著

北 京

冶金工业出版社

2007

内 容 提 要

本书为高等学校教材,书中除讲述传热学课程的基本内容之外,重点在于理论上的发展和创新,特别是相似理论以数相似定理为重点,连同准数方程取·代法和现象相似定理,发展了本来作为相似理论核心而止于模型现象的三个定理,直接描述实际现象的准数实验式的同名相似。热价值理论区分了炉内的热量,模型地得到三个净热热价值说、四个供热热价值以及三个关系到热效应顺行的顺行指南。不仅以其多个模型而具有理论意义,还因其能够连同模型公式的定性分析原理,使工业炉中的诸多难题,特别是热效应问题一举得到解决,而具有节能、增产的实际意义。

本书可作为热能工程和相关专业本科和研究生教材,也可供相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传热学/任世铮编著. —北京:冶金工业出版社,
2007. 12

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-4334-4

I. 传… II. 任… III. 传热学—高等学校—教材
IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 151681 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmp. com. cn

责任编辑 宋 良 李枝梅 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4334-4

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2007 年 12 月第 1 版, 2007 年 12 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 9.5 印张; 249 千字; 140 页; 1-3000 册

20.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010) 65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

本书系笔者在总结 50 余年来教学和科研心得体会的基础上编写而成，有部分内容已见于东北工学院冶金炉教研室所著《冶金炉理论基础》一书中，现已有所改进和发展；另有部分尚属初次与读者见面。本书首先是一本教材，适用于高等学校以工业炉为对象的热能专业学生学习，也可作为工程技术人员阅读的参考书。

研究对流传热问题时，即使是由微分方程解得给热系数的计算式，也常有实验修正和如何推广使用的问题，更不论那些不能得解的问题了。相似理论恰好是可以用来指导实验研究并使研究成果得以推广应用的理论。在研究对流传热的各种方法中，本书注重相似理论的阐述，主要论证了数相似定理、准数方程取·代法和现象相似定理，以便读者在有限的学时内，掌握一套比较完整的、以实验研究为主的寻求给热系数的理论和方法，其意义不仅限于对流传热和某个专业。

热价值理论是工业炉节能、增产的理论，由于工业炉应用于多个行业而有更广的适用意义。它其实是把炉内热量区分为净热、供热以及热效应的效应热，并可能随冷、热体在炉内的行程、时间和截面上的位置的不同，而有不同的热价值。本书在将有关的换热模型推进成净热热价值模型，并补充了必要的供热模型之后，又依据净热热价值说 I、II、III，演绎出关系到热效应顺行而含有顺行指南 I、II、III 的顺行原理，终于能够据以说明工业炉中的大量实际问题。

以前，由于炉内一些热气行为不易理解，曾于水力学课程之外，另开一门气体力学课程。现在，这些问题（包括相似理论）都已解决，宁将气体力学与水力学合并成流体力学，不如像本书这样，将某些气体力学的内容合并在对传热学中，使之纳入专业教研室，结合实习，才更有利于其发展。另外，炉膛热交换理论是早年炉子构造课程的重要内容，目前已有所发展，也理所当然地宜于放在本书里。

书中引用了一些工程上常见的实例，便于学生学习和思考。在课堂教学上要注意安排测验，辅之以课外练习，以便检验学生对书中内容的掌握程度。鉴于传热学的内容极其丰富，本书难于以点概全，但愿读者能够通过学习本书，对传热学产生兴趣，为日后学习和研究奠定基础。

东北大学对本书的出版提供了资助，教务处和材冶学院给予了支持和鼓励，家人任蔚、张志红、杨美玉为本书的文字录入付出了辛勤劳动，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中若有不妥之处，恳请读者批评指正。

作 者

2007 年 4 月

目 录

1 绪论	1
1.1 量纲与单位	1
1.2 量与数	1
1.3 模型	3
1.4 模型公式的定性分析原理	3
1.5 溢气、吸风和烟囱	5
1.6 分流定则	6
参考文献	9
2 稳定导热	10
2.1 傅里叶定律	10
2.2 导热系数	10
2.3 通过单层壁的热流和壁内的温度分布	12
2.3.1 平壁导热	12
2.3.2 圆筒壁导热	13
2.3.3 球壁导热	13
2.3.4 平均导热面	14
2.4 多层壁的导热	15
2.5 有均匀内热源的稳定导热	17
2.6 导热系数实验式中 λ_0 和 b 的确定	18
2.7 二维稳定导热——有限差分法	19
2.7.1 高斯—赛德尔迭代法举例	19
2.7.2 对流边界节点的差分方程	21
习题	22
参考文献	24
3 对流传热及相似理论	25
3.1 牛顿公式 (1701 年)	25
3.2 描述对流传热的微分方程和单值条件	25
3.2.1 描述给热的微分方程	25

3.2.2 单值条件	28
3.3 相似理论	29
3.3.1 数相似定理	29
3.3.2 准数方程取·代法	31
3.3.3 现象相似定理	35
3.4 对流传热的准数方程	36
3.5 方向性研究	38
3.6 准数实验式的确定	40
3.7 准数实验式举例	41
习题	48
参考文献	49
4 辐射传热	51
4.1 辐射的基本概念	51
4.2 辐射的基本定律	52
4.2.1 普朗克定律 (1900 年)	52
4.2.2 维恩定律	53
4.2.3 斯蒂芬-玻耳兹曼定律	54
4.2.4 余弦定律	54
4.3 角系数	56
4.3.1 有关角系数的基本概念	58
4.3.2 无限长直线平行移动形成的面之间的角系数	59
4.4 有效辐射和投射辐射	60
4.5 黑体模型、克希霍夫定律和灰体	61
4.6 二表面空腔中的辐射热交换	62
4.7 多表面空腔中的辐射热交换	64
4.8 热阻效应	65
4.9 阀效应	67
4.10 气体的辐射和吸收	69
4.10.1 比尔定律	70
4.10.2 气体的辐射能力和黑度	71
4.11 封闭空腔中有辐射性气体的辐射热交换	73
4.11.1 无限长直管道中的辐射热交换	73
4.11.2 辐射性保护气体的热阻作用	73
4.11.3 火焰炉的炉膛模型	74
习题	78

参考文献	79
5 不稳定导热	80
5.1 综合热流和综合给热系数	80
5.2 薄材在恒温介质中的加热	80
5.2.1 综合给热系数法	80
5.2.2 辐射系数法	81
5.2.3 生产率	82
5.3 傅里叶微分方程的解	82
5.3.1 第一类边界条件	82
5.3.2 第二类边界条件	88
5.3.3 第三类边界条件	89
5.4 有限差分法	95
5.4.1 已知表面温度 t_0 的变化规律	95
5.4.2 加热介质温度 t_0 为常量	96
5.4.3 二维不稳定导热	98
习题	99
参考文献	99
6 换热器及热价值理论	100
6.1 传热方程和传热系数	100
6.2 加强给热和绝热	101
6.3 换热器	102
6.3.1 换热方程	102
6.3.2 出口温度	104
6.3.3 顺流和逆流的对比	106
6.4 蓄热室和热风炉的传热系数	106
6.5 热价值理论	109
6.5.1 净热热价值	110
6.5.2 供热热价值	114
6.5.3 顺行原理	117
6.5.4 热价值理论的应用、印证和结论	119
习题	126
参考文献	126
附 录	127
附录 A 最小二乘法	127

附录 B	金属材料的密度、质量热容和导热系数	129
附录 C	保温、建筑及其他材料的密度和导热系数	131
附录 D	几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	131
附录 E	干空气的热物理性质 ($p = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$)	132
附录 F	在大气压力 ($p = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$) 下烟气的热物理性质 (烟气的成分: $\text{CO}_2 0.13$; $\text{H}_2\text{O} 0.11$; $\text{N}_2 0.76$)	133
附录 G	饱和水的热物理性质	134
附录 H	物体表面的黑度	135
附录 I	当 $y < 1$ 时, 函数 $\varphi(y) = y + \frac{1}{5}y^5 + \frac{1}{9}y^9 + \cdots$ 的值	137
附录 J	换热器为各种流动方式时计算平均温压的修正系数	137

1 绪 论

自然界只要有温度差的地方,就有传热。如此,传热学也就能够渗入自然科学的不同领域而得到广泛的应用。像工业炉这样的加热设备,为达到节能、高产和优质的目的,自然更是离不开传热学了。

传热是一种复杂过程,通常被区分为3种基本形式,即传导传热,简称导热;对流传热,简称给热;辐射传热,又因强调机理而称为辐射热交换。后两种传热又常笼统地称为换热,特别是在它们同时存在于换热装置里时。例如,某个传热面可简单而有区别地称为导热面、给热面、辐射热交换面或换热面。另外还要看采用什么传热的基本公式。例如,辐射传热被表示成给热的形式时,称其为辐射给热;兼有对流和辐射的传热在被表示成给热的形式时,称其为综合给热;综合给热与导热相串联的传热,则又简称为传热。本书联系实际,在换热装置内用得最多的将是“换热”一词。

1.1 量纲与单位

具体地讲,米、尺和呎等是不同单位制的长度单位;千米、米和毫米之间有着简单的倍数关系,也都可以用作长度的单位。长度作为此类单位的共性,便是一种量纲(又称因次),表示为 L 。量纲体现了物理量的性质。常见的量纲还有时间 T 、温度 θ 、质量 M 等。这些量纲又称为基本量纲。具有基本量纲的物理量称为基本量纲量。长度 L 、 L_0 、 L_1 等是量纲为 L 的基本量纲量。通过某种基本定义或定律与基本量纲量有联系因而具有导出量纲的物理量,称为导出量纲量。考虑物理量的量纲时,可以用加方括号 $[]$ 的方法来表示。例如速度 w 的量纲为:

$$[w] = \left[\frac{dx}{dt} \right] = \left[\frac{x}{t} \right] = LT^{-1}$$

力 F 的量纲按牛顿第二定律便是

$$[F] = \left[m \frac{d^2x}{dt^2} \right] = \left[m \frac{x}{t^2} \right] = MLT^{-2}$$

热量 H 的量纲本与功的量纲一样,是导出量纲,但因在传热学中实际上可以不计热功转换,便可以根据下面要讲到的理论上的需要取为基本量纲,表示为 H 。这样一来,传热学中常见的量纲共有5个,即 L 、 M 、 T 、 θ 和 H 。这种选取,关系到后面在量纲分析中如何根据物理量的单位判断其量纲。表1-1中列出了传热学中一些常见物理量的单位和量纲。

绝对温差 ΔT 可以按工程单位制表示为摄氏温差 Δt ;一些关系到 Δt 的物理量,例如导热系数等,本书此后都变其单位中的 K 为 $^{\circ}C$ 。

1.2 量与数

物理量常被表示成无单位的数与单位的乘积的形式。对比之下,量都有单位;数都没有单位。

某些系数,诸如传热系数和体膨胀系数等,有单位,虽有数之名,仍然是量而不是数,一些物理量的单位和量纲如表1-1所示。

表 1-1 常见物理量的单位和量纲

物理量名称及符号	单位名称及符号	量 纲
长度 L, l	米 m	L
笛卡儿坐标 x, y, z	米 m	L
时间 τ	秒, 分, 时, 日 s, min, h, d	T
质量 m	千克 (公斤) kg	M
质量体积 v	立方米每千克 m^3/kg	L^3M^{-1}
热力学温度 T	开 [尔文] K	θ
摄氏温度 t	摄氏度 $^{\circ}\text{C}$	θ
面积 A, F	平方米 m^2	L^2
体积 V	立方米; 升 $\text{m}^3; \text{l}, \text{L}$	L^3
速度 u, v, w	米每秒, 千米每小时 $\text{m}/\text{s}, \text{km}/\text{h}$	LT^{-1}
加速度 a	米每 2 次方秒 m/s^2	LT^{-2}
重力加速度 g	米每 2 次方秒 m/s^2	LT^{-2}
力 F	牛 [顿] N	MLT^{-2}
压力 p	帕 Pa	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$
密度 ρ	千克每立方米, 吨每立方米, 千克每升 $\text{kg}/\text{m}^3, \text{t}/\text{m}^3, \text{kg}/\text{L}$	ML^{-3}
热量 H	焦 [尔] J	H
热流 Q	瓦 W	HT^{-1}
体积流量 q_v	立方米每秒 m^3/s	L^3T^{-1}
质量流量 q_m	千克每秒 kg/s	M^3T^{-1}
斯蒂芬-玻耳兹曼常量 σ	瓦每平方米四次方开 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$	$\text{HT}^{-1}\text{L}^{-2}\theta^{-4}$
面积热流 q	瓦每平方米 W/m^2	$\text{HT}^{-1}\text{L}^{-2}$
质量定压热容 c_p	焦每千克开 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$\text{HM}^{-1}\theta^{-1}$
质量定容热容 c_v	焦每千克开 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$\text{HM}^{-1}\theta^{-1}$
黏度 μ	帕秒 $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$
运动黏度 $\nu = \mu/\rho$	平方米每秒 m^2/s	L^2T^{-1}
体膨胀系数 β	每开, 负一次方开 K^{-1}	θ^{-1}
导热系数 λ	瓦每米开 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\text{HL}^{-1}\text{T}^{-1}\theta^{-1}$
导温系数 a	平方米每秒 m^2/s	L^2T^{-1}
给热系数 α	瓦每平方米开 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$\text{HL}^{-2}\text{T}^{-1}\theta^{-1}$
传热系数 K	瓦每平方米开 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$\text{HL}^{-2}\text{T}^{-1}\theta^{-1}$

平面角和立体角没有数之名, 还有单位, 分别为 rad (弧度) 和 sr (球面度), 实质上可以省去, 便是数而不是量。

某些物理量, 如若采用相一致的单位, 其某种组合, 例如 $Re = \frac{ul}{\nu}$, 在进行量代数时, 可

以消去单位而成数。单位也就可以在这种组合中一般地用量纲取代。于是,物理量便又称量纲量,其无单位的组合数,乃至各种无单位数,便又称无量纲数。在国家标准 GB 3100—86^[1] 等中,称此等无量纲数(包括平面角和立体角)为无量纲量是不恰当的。在新的国家标准 GB 3100—93 等中,又改称为量纲为 1 的量,仍误认数为量;还似乎 1 也成了量纲。其问题在于把量的量纲与其前的数分开来处理所致。进而旧新标准又分别从其所谓的无量纲量和量纲为 1 的量中区分出 Re 等并先后称之为无量纲参数和特征数。既已是量,就不得随便改称为数。这实质上是对其量纲为 1 的量缺乏信心,重又回到普遍称谓的数上来了,本书宁愿称所有量纲消尽的组合数为准数,其中的 L_1/L_0 、 X/L_0 等为简单型的。准数本是相似领域中的一种旧称呼,是否包括简单型的,各书可视需要而定。

准数重要而又无量纲,其组成量乃至所有的量纲量便都应在量纲和单位上尽量简化,而不迁就某个量的某种物理意义。即使是平面角和立体角,在不同的领域中也已处于省去单位与否两可的状态。因而,本书将视辐射亮度 I 的单位为 W/m^2 ,而不是 $W/m^2 sr$ 。

1.3 模型

传热学为能从复杂的传热过程中找到定量关系,必须作出一些假定,这样就构成了一种未必存在,却又抓住了要点而能与众多实物或实际相对照的模型。这些假定便又称为模型条件;其能通过某个或某几个基本定律相互联系者,还能引出有关量之间的模型公式。模型公式既是模型条件相应而至的结果,便也可以包括在广义的模型中。例如,为要忽略表面边缘上温度差异的影响,便假定表面无穷大等。为要模型公式的定量计算有效,还应针对模型与实物在条件上的差异有所修正,否则就意味着存在未经修正的误差。一个复杂的模型既可以在模型公式上对全部假定或部分假定进行修正,又可以全无修正。所有给出的假定通常都不总结,却都是算数的,并要在进一步的研究中保留其所应有的修正。这种修正只能来自实验。模型公式的要害常常是缺乏修正。凭经验对模型公式乘上一个综合性的系数或有所加减,也算是一种修正。一个好的修正往往有个反复的调整过程。模型公式通过计算机用于控制,例如控制炉子,可以在使用中调整其修正。这时,一个尚欠完善的模型公式也常比没有公式好。模型公式还可以用于定性分析,这正是本书所要论述的。既得定性结论,再实验定其量,其实是绕过了也要有实验修正的模型公式的圈子。模型公式用于设计计算,便不能不有修正。反之,各种设计又可以在实践中为模型公式提供数据以调整其修正。其实,传热学中除了某些基本定理以外,其余多为模型。即使其模型公式是可以直接用于计算的代数方程,也未必能够一目了然其有关量之间的相互影响关系。对于像工业炉这样复杂的热工设备,能够应用模型公式作出适当的定性分析是很有意义的。为此,下面要讲一下模型公式的定性分析原理。

1.4 模型公式的定性分析原理

微分方程及其所有的附加条件描述的现象称为模型现象。我们现在所说的模型现象仍具有这种性质,却应理解为由微分方程的解或代数方程形式的模型公式及其附加的模型条件所描述。通常,在对模型公式作定性分析时,都是假定其他条件不变,只看其中某个体现,例如 x 有变,会对 y 有什么影响。若有其他这样的体现有变也照此。如若公式复杂,就难于分辨。其实, y 对 x 的偏导数 $\frac{\partial y}{\partial x}$ 即具有这种性质。

模型公式在模型条件下可以取得定量效果,比没有模型公式便于发展和提高;用于实际,

包括通常所说的模型实验，由于条件上有差异，便要对照算得的结果有所修正，以变模型数据为实际数据。例如 $\frac{\partial y}{\partial x} = A$ ，不论 A 是什么复杂的函数，都可以表示为：

$$\left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_r = \mu_1 A \quad (1-1a)$$

$$\text{和} \quad A_r = \mu_2 \frac{\partial y}{\partial x} \quad (1-1b)$$

以 μ_2 乘式 (1-1a) 的两边，又以 μ_1 乘式 (1-1b) 的两边，并与原式 $\frac{\partial y}{\partial x} = A$ 相对照，便有：

$$\left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_r = \mu_0 A_r \quad (1-1c)$$

式中，下标 r 表示实际条件，以与没有下标的模型条件相区别； μ_1 、 μ_2 和 μ_0 是修正系数，在此 $\mu_0 = \frac{\mu_1}{\mu_2}$ 。由于模型公式都建立在某种基本定律的基础上，各个 μ 便只能大于零，而不会小于零。因而式 (1-1a) 中的 $\left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_r$ 在大于或小于零上，与 A_r 相一致。进而又由式 (1-1b) 知道， $\left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_r$ 与 $\frac{\partial y}{\partial x}$ 相一致；同样， A_r 与 A 相一致。这实质上是说，模型公式用作定性分析可以让本来 $\frac{\partial y}{\partial x} = A$ 全都具有实际意义，而不计模型与有同样有关量的实际或在有关量上有同样体现的其他模型之间所存条件上的差异（见 p. 7, 78）。 A 大于零，表明实际上 y 与 x 共增减； A 小于零，则 y 与 x 有相反的增减。 $|A|$ 越大，所得 $\frac{\partial y}{\partial x}$ 的这种结论越明显。如果 $|A| \ll 1$ ，则 y 方面的这种增减会远较 x 方面小（见 p. 7）。若能令 $A(x) = 0$ ，还可以从中得知实际条件下 y 有极值而定量了。在 A 为定值或其中不存在 x 和 y 并在其他条件不变时， $\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ ，则由 x 的微分值得到的结论，对于实际条件下 x 为有限值时也适用（见 p. 111）。

极值的存在是因为 A 中存有使之大于零和小于零的两个方面。在定性分析中，有时可以因为某一方面起决定作用便不计另一方面而得到简化（见 p. 7）；同时，模型条件中本来与实际存在的偏差有时竟一笔勾销也是可能的（见 p. 109）。

在取偏导数时，模型公式中被视为常量的量，实际上未必能够始终不变，而是全都连同其他没有体现出来的条件，例如稳定、绝热、连续以及换热器模型中热、冷体的流向等有变的差异交由各个 μ 承担。这些 μ 在定性分析中被排除掉，同时，也就排除了实际与模型之间这样的一些差异。所谓假定其他条件不变，才能作为一种手段而不虚妄（见 p. 7）。若是定量计算，随着这种差异的不同，便要有不同的修正了。

取偏导数并以 A 大于或小于零为准，本就有可能在令多余体现一定时有所排除，便不如以能有最基本的体现为准，先排除一些枝节因素的干扰，让模型条件乃至模型公式简单。为了显示某种体现，常假定某种相关的量均匀甚至为常量；必要时，也可以参照实际，假定其在过程中按某种曲线变化（见 p. 108）。多个表面即可因此以合理的形式简化成一两个最基本的表面（见 4.11.2）。模型公式必须条件清楚，不要貌似联系实际，实质上却有自相矛盾处（见 p. 77, 78）。其应用于实际上的定量计算时，对于条件上的差异，都要有修正。一个模型可以附带另一个模型。修正可以集中到前者身上，因其难于准确确定，实际上常要在实践中有个调整过程。

如果在偏导数的基础上还要找出 A 中某种体现有变的影响, 则要通过进一步的偏导数或假定其他条件不变来实现。如果模型公式中某种体现的性质有变, 即使是因变与非因变之变, 也有可能要另立模型。

不同形式的高阶偏导数及其演化结果也都在定性分析中具有实际意义。一个模型公式有多大的意义, 就看它有什么样的体现 (见 p. 124, 125); 用到一些数学, 重要的是物理。像工业炉这样复杂的问题不是一两个模型公式就能一举解说清楚的。

对于相类似的模型, 模型公式形式上相同, 甚至模型公式相对应的部分形式上并不相同, 或并不完全相同, 例如有部分分别为 Δt 和 ΔT^4 , 都可以定性地说成是温度增, 相对应的其他部分也如此, 因此, 相同的模型公式的定性表述可以相互推广应用。

一种模型的模型公式有时还可以推广应用到另一种现象中与之相类似的部分, 其余部分由于遵守另外的基本定律, 则可以借助其已经形成的概念予以补充 (见 p. 69)。

本书将要对诸多炉子问题作出定性分析。流体力学是本书的先行课, 然而这方面的书籍多不联系工业炉。为此, 下面先讲几个有关工业炉气体力学的问题。其实是把格鲁姆^[2]早年的炉子理论全面模型化了, 并增加了烟囱内烟气的最佳温度。另外还增加了一节 (4.9) 阀效应。其倒转河床说也随实际操作发展成后面的定向供热了。

1.5 溢气、吸风和烟囱

炉子上常有开口, 或者溢气, 或者吸风, 或者兼而有之, 怎样认识呢?

设有一容器, 其中充有气体, 容器外面是空气, 都处于静止, 并都遵守流体平衡方程。

$$\text{容器内} \quad Z\rho g + P = C_1$$

$$\text{容器外} \quad Z\rho_a g + P_a = C_2$$

式中, $Z\rho g$ 和 $Z\rho_a g$ 称为位头; P 和 P_a 称为静头; Z 是容器内、外同一水平截面到同一基准水平面的垂直距离。基准面在下, Z 为正值; 基准面在上, Z 为负值; ρ 和 ρ_a 是气体和空气的密度; g 是重力加速度; P 和 P_a 是气体和空气在 Z 水平面上的压力; C_1 和 C_2 是不同的常量。

让此二式中的上式减下式, 考虑到实际上 $\rho_a > \rho$, 得:

$$-Zg(\rho_a - \rho) + (P - P_a) = C_1 - C_2$$

以 Z 代替 $-Z$, 则基准面在上, Z 为正值; 在下, 为负值。再令 $\Delta P = P - P_a$, $C = C_1 - C_2$, 则有:

$$Zg(\rho_a - \rho) + \Delta P = C \quad (1-2)$$

式中, $Zg(\rho_a - \rho)$ 称为过剩位头; ΔP 称为过剩静头。显然, Z 越大, 即越向下远离所取基准面, ΔP 即内外气体的压力差越小。基准面不影响问题的实质。重要的是: 越向下, ΔP 越小; 反之, 越向上, ΔP 越大。 $\rho_a - \rho$ 越大时, 这种情况越明显。

若容器的顶部 $\Delta P = 0$, 其下都不同程度地小于零; 若容器的底部 $\Delta P = 0$, 其上都不同程度地大于零。若中间的某处 $\Delta P = 0$, 则其上 $\Delta P > 0$, 其下 $\Delta P < 0$ 。 $\Delta P > 0$ 处, 会有气体自孔隙溢出; $\Delta P < 0$ 处, 又会有空气自孔隙吸入。冬天室内有暖气, 外面温度又低时, $\rho_a - \rho$ 大, 这种现象便较夏天明显。缝隙的高度差大时, $\Delta P > 0$ 与 $\Delta P < 0$ 的差别也大。炉子的 $\rho_a - \rho$ 相对很大, 近炉门中间处被控制为 $\Delta P \approx 0$ 时, 便见上部的缝隙冒火, 下部的缝隙虽无所见, 其实是在吸入冷风的。

烟囱便是这样一种有烟气出又有烟气入, 能够连续工作的设备。烟气的温度越高, ρ 越

小,特别是在冬天, $\rho_a - \rho$ 越大,越有利于其排烟。然而,烟气的温度越高,流动中的阻力损失越大,就越不利于其流动。这种矛盾决定其中有个最佳温度。式(1-2)称为应用于二流体的流体平衡方程^[3]。它既简化了本来对溢气、吸风现象的解说,又为下面建立应用于二流体的伯努利方程^[3]奠定了基础。只要变容器为不受端头影响的管道,内有气体连续、稳定、不可压缩地流过,即可得到:

$$Z(\rho_a - \rho)g + \Delta P + \frac{W^2}{2}\rho + h_{\text{失}} = C \quad (1-3)$$

式中, $\frac{W^2}{2}\rho$ 是管内任意截面上气体的动头; $h_{\text{失}}$ 是管内气体由初始截面至该任意截面的阻力损失。

设烟囱为直管道,没有热损失。以其出口截面2为基准,则 $Z_2 = 0$; 考虑到该截面上 $\Delta P_2 = 0$, 这是一种自动调节,它提高了式(1-3)的意义;不计底截面上拐弯的影响,或者说底截面位于烟道上没有端头影响处,进而不计底顶两截面上相抵消的动头,便有:

$$H_1(\rho_a - \rho)g + \Delta P_1 = \xi \frac{W^2}{2}\rho$$

式中 H_1 ——烟囱高;

ΔP_1 ——烟囱底部内外气体的压力差;

W ——烟囱截面上烟气的平均流速;

ξ ——烟囱内考虑了拐弯影响的烟气的阻力损失系数。在 Re 较大时实际上为常数。

把烟气的密度和流速表示为标准状态下的密度 $\rho_0(t)$ 和流速 $W_0(t)$, 得:

$$H_1 g \left(\rho_a - \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \right) + \Delta P_1 = \xi \frac{W_0^2}{2} \rho_0 (1 + \beta t) \quad (1-4)$$

式中, β 是气体的体膨胀系数, 等于 $\frac{1}{273}$; W_0 受制于炉子的供热。

对于上式, 取 $\frac{\partial \Delta P_1}{\partial t}$, 并令其等于零, 便知烟囱有最小 ΔP_1 , 或其绝对值为最大抽力时的烟气温度 t 为:

$$t = 273 \left[\frac{2H_1 \rho_0 g}{H_1 \rho_a g + \Delta P_1} - 1 \right] \quad (1-5)$$

如果 $\rho_0 = \rho_a$, $\Delta P_1 = 0$, 则 $t = 273^\circ\text{C}$ 。

实际上, 根据式(1-5), 当 $\Delta P_1 < 0$, $\rho_0 \approx \rho_a$ 时, 烟囱内烟气的最佳温度常大于 1000°C 。烟囱内烟气的阻力损失大时, 例如铁皮烟囱, ΔP_1 常较大, 最佳 t 便要低一些。

式(1-5)^[3]进一步显示了模型公式的意义。

式(1-4)也可用来计算烟囱高度^[3], 这一工作, 还有烟囱直径的计算通常是在设计课上参照现成的炉例自行完成的。

1.6 分流定则

气体在流过通道的过程中, 有时希望它自通道壁吸取热量而渐被加热; 有时又希望另有气体把热量传给通道壁而渐被冷却, 两者交替进行。通道往往是多排并列, 为要气体能够均匀分布, 这中间还有个流向问题。

首先假定气体在相同的竖直分通道（图 1-1）中作等温流动，稳定，不可压缩，且分流均匀；分通道入口和出口处气体的压力 P_1 和 P_2 为各个分通道所共有，因而可以认为 $P_1 - P_2 = C$ 为定值。于是考虑了分通道中气体阻力损失的伯努利方程，在注意到其中气体的流速 $W = W_0 \beta T$ 和密度 $\rho = \rho_0 / \beta T$ 之后，可以简单地写作：

$$\Delta Z \rho_0 g / \beta T + \xi \frac{W_0^2}{2} \rho_0 \beta T = C \quad (1-6)$$

式中 $\Delta Z = Z_2 - Z_1$ ——分通道出入口之间的垂直距离，向下流动时 $\Delta Z < 0$ ，向上流动时 $\Delta Z > 0$ ；

ρ_0 ——气体在 0°C 下的密度；

g ——重力加速度；

β ——气体的体膨胀系数，等于 $1/273$ ；

T ——气体的绝对温度；

ξ ——分通道中气体的综合阻力损失系数；

W_0 ——分通道中气体折合成其在 0°C 时的流速，其大小又表明流量的大小。

式（1-6）的特点是形式上考虑了阻力损失，却因等温流动和不可压缩等假定条件偏离了换热的工作实际，所以仍为模型公式。

由式（1-6）取 W_0 对 T 的偏导数，得：

$$\frac{\partial W_0}{\partial T} = \frac{\Delta Z \rho_0 g / \beta T - \xi \frac{W_0^2}{2} \rho_0 \beta T}{\xi W_0 \rho_0 \beta T^2} \quad (1-7)$$

$\frac{\partial W_0}{\partial T} > 0$ 表明分通道中 W_0 随 T 共升、降； $\frac{\partial W_0}{\partial T} < 0$ 则表明分通道中 W_0 与 T 的升、降相反。

当 $\xi \frac{W_0^2}{2} \rho_0 \beta T < \frac{|\Delta Z| \rho_0 g}{\beta T}$ 时阻力损失较小， $\frac{\partial W_0}{\partial T}$ 的大于或小于零取决于 $\frac{|\Delta Z| \rho_0 g}{\beta T}$ ，特别是

其中的 ΔZ 即流向；当 $\xi \frac{W_0^2}{2} \rho_0 \beta T > \frac{|\Delta Z| \rho_0 g}{\beta T}$ 时，阻力损失较大， $\frac{\partial W_0}{\partial T}$ 的大于或小于零则取决于 $\xi \frac{W_0^2}{2} \rho_0 \beta T$ 而与流向无关。

按模型公式的定性分析原理，式（1-7）用于定性分析，可以理解为是在实际条件下。这时，分通道中有换热， $\frac{|\Delta Z| \rho_0 g}{\beta T}$ 是气柱作用在其底面的重力，又由于气柱彼此连通，它又是作用在其他气柱底面的上推力； $\xi \frac{W_0^2}{2} \rho_0 \beta T$ 是变温流动下气体的阻力损失，温度 T 这时是一个笼统的概念； $\frac{\partial W_0}{\partial T}$ 是流量随这种温度的变率；这种温度反之又随流量而变。不难理解，一定温度下的热气增时，分通道中气体的温度便要升；一定温度下的冷气增时，分通道中气体的温度便要降。这其实可以从后面的式（6-13）看出来。

这种温度效果可以消除原有的温度波动，使流动恢复正常而分流均匀；也可以加强原有的温度波动，使不同分通道中的流动在总流量一定的条件下，此长彼消，向两极分化，而分流不均匀。表 1-2 为阻力损失较小的分流，其序号为 1、2、7、8 的分通道，以及表 1-3，为阻力损失较大的分流，其序号为 1、2 的分通道，都是分流能够均匀的；其余表 1-2 中序号为 3、4、

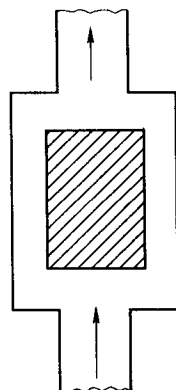


图 1-1 气体的分流图

5、6 的分通道，以及表 1-3 中序号为 3、4 的分通道则是分流不均匀的。在这些不均匀的分流中还有个程度上的差别。

表 1-2 阻力损失较小时的分流

流 向	热气渐被通道冷却				冷气渐被通道加热			
	向 下		向 上		向 下		向 上	
	$\frac{\partial W_0}{\partial T} < 0$		> 0		< 0		> 0	
序 号	1	2	3	4	5	6	7	8
温度波动	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
流量效果	↓	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↓
流量效果引起的温度效果	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↑
分通道情况	恢复正常	恢复正常	流量大增	流量大减 乃至倒向	流量大减 乃至倒向	流量大增	恢复正常	恢复正常
分流情况	均 匀		很不均匀		很不均匀		均 匀	

表 1-3 阻力损失较大时的分流

流 向	热气渐被通道冷却		冷气渐被通道加热	
	向 下		向 下	
	$\frac{\partial W_0}{\partial T} < 0$		< 0	
序 号	1	2	3	4
温度波动	↑	↓	↑	↓
流量效果	↓	↑	↓	↑
流量效果引起的温度效果	↓	↑	↑	↓
分通道情况	恢复正常	恢复正常	流量减，不至下流	流量增
分流情况	均 匀		不够均匀	

在阻力损失较小时，对分流起决定作用的是 $\frac{|\Delta Z| \rho_0 g}{\beta T}$ 。这时，分通道作为连通器不同温度的分支，其温度较高者，底面上受的重力较小；而受的上推力较大。不同分支的温差加大时，能使流量变小的表 1-2 中序号为 4 和 5 的分通道中的气体不流，乃至像闲置的烟囱那样发生倒向流动；而使另外的表 1-2 中序号为 3 和 6 的分通道中的流量大增。

在阻力损失较大时， $\frac{|\Delta Z| \rho_0 g}{\beta T}$ 的作用可以不计。这时，如前所说， $\frac{\partial W_0}{\partial T}$ 恒小于零，则无论向上还是向下流动，对于气体温度不断向上波动的表 1-3 中序号为 3 的分通道，流量不断下降；对于气体温度不断向下波动的表 1-3 中序号为 4 的分通道，流量又不断上升。然而在阻力损失较大的前提条件下，不同分通道中气体温度 T 都是大于室温的，其差异有限；流量的差异也不至于太严重。

阻力损失较小的流动与阻力损失较大的流动可以随流量和温度的变化相互转变，分流的情况也随之转变。

概而言之，上述论证可以归结成如下的分流定则：阻力损失较小时，热气渐被通道冷却向