

高等学校试用教材

冶金传输原理

东南大学 苏华钦 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

东南大学出版社

内 容 提 要

本书是根据全国高等工业学校铸造专业教材分编委员会拟定的大纲编写的,系统论述了冶金过程传热、传质及动量传输的基本理论。全书共三篇15章,即动量传输篇,热量传输篇和质量传输篇,各章均有一定数量的例题和习题,以加深对基本概念的理解和应用。

本书适用于作铸造及其它热加工专业大学本科、专科教材,也可供从事热加工技术的人员参考。

冶 金 传 输 原 理

苏华钦 主编

东南大学出版社出版

(南京四牌楼2号)

江苏省新华书店发行 人民印刷厂印刷

开本787×1092毫米 1/16 印张23.75 字数563千

1989年12月第1版 1989年12月第1次印刷

印数: 1—3000册

ISBN 7-81023-276-2

TH·12

定价: 4.70元

前 言

本书是根据1983年11月全国高等工业学校铸造专业教材分编审委员会扩大会议审定的《冶金传输原理》教学大纲,由机械电子工业部教材编辑室组织编写并经全国铸造专业教材分编审委员会审定通过。本书共分三篇十五章:第一篇动量传输:第一章阐述流体的性质及其流动;第二、三、四章是讲流体静力学基本方程以及流体动力学中的层流和紊流问题;第五章讲述能量守恒方程及其应用;第六章讲风机的主要构造与性能。第二篇热量传输:第七章是讲述导热基本定律;第八、第九章讲述层流及紊流的对流换热和热平衡方程;第十章讲述固体中的稳定态和不稳定态导热;第十一章讲辐射换热。第三篇质量传输:第十二章讲述菲克扩散第一定律和第二定律;第十三、十四、十五章分别讲述固体中、流动体系中和相间的传质问题。

本书编写时考虑了下列几点:

1. 冶金传输原理是高等工科学校铸造专业的一门必修课。考虑到四年制教学计划中未设置与本课程有关的先行基础课——流体力学和传热学,因此,虽然动量、热量和质量三种传输过程具有类似的基本概念、运动规律和解析方法,但为了使學生接受和便于阐明这三种过程,本书仍按三种传输过程分篇编写。

2. 冶金传输原理是一门较偏重数理解析的课程,在教材内容和解析方法上,着眼于物理概念和数学表达的统一。从目前的实际出发,对有关的数学解析,做了较详细的运算;但应指出,本课程毕竟属于工程的范畴,主要是阐明和建立有关传输过程的物理概念和计算方法,数学仅是分析问题和说明过程的手段。

3. 为了理论密切联系实际,书中附有必要的图表数据和例题。各章末附有思考题和习题(有答案)。借助例题启发和习题求解,引导学生学以致用,并促进理论深化,从而培养学生分析问题和解决问题的能力。

4. 在本书中采用了铸造冶金过程中的动量传输、热量传输和质量

传输的最新成就。全书采用国际单位制。

本书由东南大学苏华钦教授主编(编写第一、二篇),吴炳尧副教授协编(编写第三篇),浙江大学王启东教授主审。黄显珪副教授协审。

本书编写和审稿过程中,得到了机械电子工业部机械教材编辑室、西安交通大学、重庆大学等单位的支持和帮助,还得到了东南大学研究生徐洪庆、吴为学、吴宇宁、王其桂、陆文周、江建中、吴强和戴仲琦同志以及莫嘉平同志的各种帮助,在此致以衷心谢意。

由于编者水平所限,疏漏与错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1988年10月

本书采用主要符号一览表

A	面积	E_{λ}	单色辐射照度
α	热扩散率(热扩散系数) $\alpha = \lambda / \rho c_p$	F	力
B	质点的淌度	F_K	阻力
b	宽度	F_0	傅立叶(Fourier)数
Bi	毕奥(Biot)数	F_r	弗劳德(Froude)数
C	热容	f	摩擦系数
c	整个溶液的浓度	f	扩散中的相关系数
c_i	溶液中 <i>i</i> 组分的浓度	G	投入辐射
C_m	摩尔热容	G_r	格拉晓夫(Grashof)数
C_p	等压比热容	ΔG°	活化自由能
$\hat{C}_p$	物质的量等压热容	g	重力加速度
C_v	等容比热容	H	焓
$\hat{C}_v$	摩尔等容热容	h	比焓
D, d	直径	h	高度
$D, \tilde{D}$	互扩散系数(扩散系数)	h	传热系数
D°	自扩散系数	h_r	辐射传热系数
D_e	当量直径	h_t	总传热系数, 即对流和辐射传热系数之和
D_i	组分 <i>i</i> 的本征扩散系数	I	定向辐射强度
D_i°	组分 <i>i</i> 的自扩散系数	J	有效辐射
D_0	扩散系数的频率因素	j	扩散流率
D_p	颗粒直径	j_H	科耳伯恩相似中所用的“ <i>j</i> 因子”
D_r	用示踪剂测定的自扩散系数	j_M	传质 <i>j</i> 因子
d	晶体点阵常数	K	两相间的平衡分配比
d	分子碰撞直径	L, l	长度
E	能量	L	半厚度
E	辐射照度	L	气体辐射的平均射线行程
E_b	黑体的辐射照度	M, m	质量
E_k	动能	M	摩尔质量
E_p	势能, 位能	M_a	马赫(Mach)数
E_u	欧拉(Euler)数	N	总质量流率(扩散流加对流)
		N_A	阿伏加德罗常数 <i>N</i> / <i>n</i>

	$= (6.022045 \pm 0.000031) \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$	$\overline{u_x}, \overline{u_y}, \overline{u_z}$	平均瞬时速度分量
N_u	努塞尔(Nusselt)数	W	重力
n	以单位体积内的分子、原子或电子数表示的浓度	w_B	物质B的质量分数
P	渗透率	x_i	组分i的摩尔分率
p	压力	Z	频率
p	分压	α	加速度
P_e	贝克莱(Peclet)数	α_l	线胀系数
P_r	普朗特(Prandtl)数	α_v	体胀系数
Q	热量	α	辐射吸收率
Q	辐射能	β	压力系数, $\beta = \frac{dp}{dT}$
Q	体积流量	γ	切应变(剪应变)
Q	扩散系数中的活化能	γ	剪应变率
q	热流密度	γ_i	组分i的活度系数
q_m	质量流量	δ	厚度
q_v	体积流量	δ	动量界面层厚度
R, r	半径	δ_c	浓度界面层厚度
R	热阻	δ_{eff}	有效浓度界面层厚度
R	气体常数 [$R = (8.31441 \pm 0.00026) \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$]	δ_T	温度界面层厚度
Re	雷诺(Reynolds)数	ε	发射率
R_h	水力学半径	ε	伦纳德-琼斯势函数中的特征能量参数
S	面积	ε	粗糙管内的内壁突起高度
S_c	施密特(Schmidt)数	η	粘度(动力粘度)
S_r	球面度	θ	过剩温度
S_t	斯坦顿(Stanton)数	θ	无量纲的温度比(差比温度)
S	距离	κ	体积压缩系数
T	热力学温度(K)	λ	热导率(导热系数)
T	摄氏温度($^{\circ}\text{C}$)	λ	原子或分子的平均自由行程
t	时间	λ	形状系数
U	内能, 势函数, 力函数	λ	辐射波波长
u	比内能	λ_B	物质B的绝对活度
v	速度	μ_B	物质B的化学势
V	体积	ν	运动粘度, η/ρ
$\overline{v}$	平均速度	ρ	密度(质量密度)
v_0	本体流速度, 稳态速度	ρ	辐射反射率
u_x, u_y, u_z	速度分量	ρ_B	物质B的质量浓度
		σ	伦纳德-琼斯势函数中的分子特

	征直径	φ_B	物质B的体积分数
σ	斯忒藩-波尔兹曼常数 [$= (5.67032 \pm 0.00071, \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4))$]	ϕ	热流量
		Ω	立体角
σ	表面张力	Ω_v	粘度的碰撞积分
τ	辐射穿透率	$\Omega_{D,AB}$	扩散的碰撞积分
τ	切应力(剪应力)	ω	角速度
τ_{yx}	等剪应力分量	ω	多孔介质中的孔隙度

绪 论

大多数铸造冶金过程,都是在高温下进行的。在进行冶金化学反应的同时,必然伴随着物质传递过程和热量传递过程。在大多数情况下,这些物理过程是在物质流动的情况下发生的,也就是说在反应介质以一定的速度运动而展开的。这就是以动量传输为基础的质量传输和热量传输,它们构成了铸造冶金过程中三个不可分割的物理过程。

传输现象(transport phenomena)是流体动量传输、热量传输和质量传输过程的统称。对质量传输而言,严格地说在固体中或静止的流体中或在垂直于浓度梯度方向作层流运动的流体中传质是由分子(或其它微观粒子)运动引起的,叫传递(transfer),或叫分子扩散或传导传质,而在紊流流动的流体中的传质主要是微团宏观移动造成的传输(transport)叫对流扩散,或叫对流传质,但上述两者总称为质量传递。由于三种传输有类似的规律性,使传输理论成为一门独立的学科,属于工程科学基础理论的范畴;但就其各部分的基本内容和有关解析方法来说,仍来源于流体力学、传热学和物质传递的各个学科领域。

尽管多年来冶金学家和工程技术人员一直在研究冶金反应和冶金过程中的问题,但是,迄今还没有一本可供铸造专业教师向学生讲授流体动力学、传热和传质的基本研究方法的统一教材。此外,近十年来,铸造(冶金)方面的发展又往往受到传输理论学科领域未能相应发展的限制。例如,吹氧熔炼,炉外脱硫,竖炉燃烧与钢锭加热强化和金属快速凝固等均与传输现象直接相关。对铸造专业学生来说,只有具备了这方面的基本知识和分析计算方法与技能,才能分析各种参数的影响以解决铸造工程中的传输问题,并推动学科的发展。这就是学习本门课程的重要意义。

就传输学科本身来说,动量传输、热量传输和质量传输是三个相互有关的现象,同时又具有类似性。宏观上,它们具有相同的规律,例如牛顿粘性定律、傅立叶传热定律和菲克传质定律,可以用同一类型的方程式来描述;微观上,它们也具有相同的规律,即传输过程都是因为分子运动或微团脉动而引起的,可以用类似的机理来阐述。把三种不同传输现象联系起来,可以应用类似法则,从一种传输现象的规律,推论出另一种传输现象的规律,从而探索新的传输规律。

目 录

绪论

第一篇 动量传输

第一章 流体的性质及其流动

1.1 流体的概念及连续介质模型	(2)
1.2 流体的主要物理性质	(3)
1.3 流体流动的形态——层流与紊流	(5)
1.4 牛顿流体粘性定律(或称牛顿内摩擦定律)	(10)
1.5 流体的粘性系数和粘性动量通量	(11)
1.6 牛顿流体与非牛顿流体	(15)
习 题	(16)

第二章 流体静力学

2.1 作用在流体上的力与流体的静压力	(18)
2.2 流体静力平衡方程及等压面	(20)
2.3 流体静压力基本方程及其意义	(24)
2.4 不同基准的压力表示法与液柱式测压计	(26)
2.5 平面及曲面上的总压力	(30)
2.6 静止液体作用在沉没物体上的总压力	(35)
2.7 等角速旋转容器中液体的相对平衡	(39)
习 题	(40)

第三章 流体动力学中层流问题

3.1 流体动力学有关基本概念	(44)
3.2 动量、动量率及动量通量	(48)
3.3 流体动量平衡关系式及层流状态下的三个简单流动实例	(51)
3.4 流体质量平衡方程——连续方程	(59)
3.5 实际流体动量传输方程——纳维尔-斯托克斯方程	(62)
3.6 理想流体动量传输方程——欧拉方程	(68)
3.7 纳维尔-斯托克斯方程的实际应用	(69)
习 题	(74)

第四章 流体动力学中的紊流问题

4.1 摩擦系数 f 值	(76)
4.2 圆管内流体流动的摩擦系数 f 的实验值	(78)
4.3 紊流状态下掠过平板、球体和其它潜体的流动	(81)
4.4 流体在固体填料层内的流动	(87)
习 题	(93)

第五章 能量守恒方程及其在流体流动中的应用

5.1 能量守恒方程——伯努利方程	(95)
5.2 流体动量传输中的各种阻力损失——摩擦阻力损失与局部阻力损失	(102)
5.3 伯努利方程应用实例——金属液从包内的流出	(113)
习题	(118)

第六章 流体的输送装置

6.1 离心式泵与离心式风机	(122)
6.2 容积式泵与容积式风机	(128)
习题	(131)

第二篇 热量传输

第七章 傅立叶导热定律和物质的热导率

7.1 傅立叶导热定律	(137)
7.2 温度场、等温面和温度梯度	(137)
7.3 热导率与热量传输系数	(140)
7.4 气体、固体和液态的热导率	(142)
习题	(145)

第八章 层流对流换热与热量传输方程

8.1 对流换热的基本概念	(148)
8.2 圆管内具有层流强制对流的换热	(150)
8.3 平板上具有层流强制对流的换热	(155)
8.4 垂直平板层流自然对流换热	(162)
8.5 热量传输方程(或称热量平衡方程)——傅立叶—克希荷夫导热微分方程	(172)
习题	(175)

第九章 紊流对流换热关系式

9.1 热量与动量传输的比拟理论	(177)
9.2 相似理论在传热实验研究中的应用	(182)
9.3 量纲分析及其在对流换热中的应用	(190)
9.4 圆管内强制紊流对流换热关系式	(197)
9.5 绕过潜体强制紊流对流换热关系式	(201)
9.6 自然对流换热系数	(204)
习题	(206)

第十章 固体中的导热

10.1 一维稳态导热	(209)
10.2 二维稳态导热	(215)
10.3 不稳态导热的基本概念	(228)
10.4 不稳态导热的数学分析解法	(230)
10.5 不稳态导热问题的数值解法	(240)
习题	(245)

第十一章 辐射换热

11.1 热辐射的基本概念	(249)
---------------	-------

11.2 黑体反射率·····	(251)
11.3 黑体辐射的基本定律——普朗克分布定律、斯忒藩—玻尔兹曼方程与兰贝特定律·····	(253)
11.4 灰体与吸收率·····	(256)
11.5 黑体间的辐射换热与角系数·····	(259)
11.6 灰体间的辐射换热——两个无限大灰体平行平板间的辐射换热·····	(263)
11.7 辐射换热的网络求解法·····	(267)
11.8 气体的辐射·····	(270)
11.9 辐射换热系数·····	(277)
习 题·····	(278)

第三篇 质量传输

第十二章 基本定律和物质的扩散系数

12.1 菲克扩散第一定律·····	(283)
12.2 菲克扩散第二定律·····	(286)
12.3 固体中的扩散系数·····	(287)
12.4 液体、气体及多孔材料中的扩散系数·····	(294)
习 题·····	(300)

第十三章 固体中的扩散

13.1 稳态态扩散·····	(302)
13.2 不稳定态扩散·····	(307)
13.3 向有限体系作非稳态态扩散·····	(314)
习 题·····	(320)

第十四章 流动体系中的传质

14.1 通过静止气膜的扩散·····	(322)
14.2 进入下降液膜中的扩散·····	(324)
14.3 对流传质及传质系数关系式·····	(327)
14.4 流体掠过平板时的扩散问题·····	(333)
习 题·····	(339)

第十五章 相间传质

15.1 相间传质理论·····	(341)
15.2 气-固反应中的扩散·····	(347)
15.3 气-液反应中的扩散·····	(349)
15.4 液-液与液-固反应中的扩散·····	(351)
15.5 温度的影响和热稳定性概念·····	(351)
习 题·····	(353)

附录

附录一 常用的流体力学单位(SI制)·····	(355)
附录二 压强单位换算·····	(356)
附录三 传热学中主要物理量SI制、工程制及英制单位的换算·····	(357)
附录四 金属材料的密度、比热容和热导率·····	(358)
附录五 几种保温、耐火材料的热导率与温度的关系·····	(359)

附录六	饱和水的热物理性质.....	(360)
附录七	液态金属的热物理性质.....	(361)
附录八	干空气的热物理性质.....	(362)
附录九	在大气压力下烟气的热物理性质.....	(363)
附录十	固体材料沿表面法线方向上辐射发射率 ϵ	(364)
附录十一	二元体系的质量扩散系数.....	(365)
附录十二	扩散系数换算表.....	(367)
参考文献		(368)

第一篇 动量传输

本篇主要研究在各种条件下的流体内在性质，流动特性，以及控制的方法与设备。大多数冶金过程均从不同侧面涉及到这方面的问题。例如，冶金炉的供风和水冷装置，炉内气体流动的规律。又如铸造冶金方面的离心铸造，水力清砂，车间通风和冷却，浇注系统的水力学计算，冲天炉预热送风装置的流动阻力计算，造型机中震实机构的耗气量，吹砂机紧实过程中的气体动力学分析，造型材料气力输送中有关悬浮速度的计算，液压气压传动中油缸和气缸的工作流量，贮压罐容积的确定等等。

在冶金化学反应中，同时发生传热和传质现象，这些现象都是在物质流动中发生的，即以反应物质在以一定速度运动中而展开的，或者说以动量传输作为基础而展开的，也就是说，传热和传质过程与流体流动特性密切相关。例如，当气体流过固体表面时，若气体温度高于固体温度，则固体会受热升温。气体热量传给固体表面的速率取决于气体的性质及其流动形式。同样，如若在铁液中加入一块石墨，则石墨的溶解速率必然与其附近的铁液的运动状况有关。这就说明在涉及传热和传质问题时，需要弄清流体流动的作用。动量传输也可说是研究流体流动特性的基本方法。本篇重点在于从传输的角度研究流体运动的规律，主要应掌握连续性方程、伯努利(Bernoulli)方程和动量方程及其在冶金过程中的应用。

鉴于流体静力平衡是动量平衡的基础，所以对此也将作扼要的介绍。

第一章 流体的性质及其流动

1.1 流体的概念及连续介质模型

1.1.1 流体的概念

液体和气体与固体相比，它们的分子间引力较小，分子运动较剧烈，因而分子分布松散。这就决定了液体和气体具有的共同特性是：不能保持一定形状，流动性很大。所以液体和气体统称为流体。

从力学性质来说，固体具有抵抗压力、拉力和切力的能力，在外力作用下，通常变形较小，而且在达到一定程度后变形就基本停止了。流体只能抵抗压力，而不能抵抗拉力和切力，在它受到切力作用时，就会产生连续不断的变形，这就是流动。由于流体对缓慢变形不显示阻力，所以流体不存在静摩擦力。以上所述就是流体与固体在力学性质上的明显差别。正因为流体具有流动性，才能实现在外力作用下通过管道或孔隙连续不断地输送到指定地点。例如熔融金属在静压头作用下，经浇注系统流入铸型中。

液体和气体除了具有前述的共同特性外，还有下列不同特性：液体的分子间距与分子的有效直径几乎相等，在加压时，当分子间距稍有缩小，就出现强大的分子斥力来抵抗外压力。这就是说，液体的分子间距很难缩小，因而可认为液体具有一定体积，所以通常称液体为不可压缩流体；又由于引力的作用，液体具有力求自身表面收缩到最小状况的特性，因此在大容器内小于容器体积的流体不能充满容器而只能占据其一定的体积，而在上部形成自由表面。

一般来说，气体分子间距很大。如在常温下空气的分子间距达 $3 \times 10^{-9} \text{m}$ ，而分子有效直径的数量级为 10^{-10}m 。由此可见，分子间距比分子有效直径大得很多。这样，只有在分子间距缩小很多时，才能出现分子斥力。所以，通常称气体为可压缩流体。又因分子间距很大，分子引力很小，于是分子热运动对其状态起了决定性作用。这就使气体既没有一定形状，也没有一定体积。因而将一定量气体充入较大的容器内，由于分子频繁不息的运动，很快就均匀充满容器，而不形成自由表面。

必须指出，在所研究的问题并未涉及到压缩性时，所建立的流体力学规律，既适用于液体，也适用于气体；当计算压缩性时，气体和液体就必须分别处理。气体虽然是可压缩的，但在许多工程问题中，气体的压力和温度变化不大（如常温、常压气流输送），气流速度远小于音速时，可以忽略气体的压缩性。此时气流与液流的运动规律，在质的方面是相同的。因此，液体运动的基本理论，对于上述气流来说也是完全适用的。

1.1.2 连续介质模型

从物理学的观点来看，流体同一切物体一样都是由分子组成的；分子之间是有空隙

的。但是在流体的动量传输以及在后面两篇将要讨论的热量和质量传输中所要研究的，并不是个别分子的微观运动，而是由大量分子组成的宏观流体在外力（如重力、压力差等）作用下引起的机械运动。宏观流体的物理量（如压力、速度、密度和粘度等），均为大量分子的行为和作用的平均效果，均能从实验中直接测出。这样，在动量传输中，为了便于研究，常用宏观流体模型来代替微观有空隙的分子结构。

1753年，欧拉(Euler)首先采用了“连续介质”的概念作为宏观流体模型。他提出可以将真实的流体、看成是由无限多流体(或称为微团)所组成的稠密而无间隙的连续介质，也就是假定了流体具有连续性和稠密性。流体既被看成是连续介质，于是反映宏观流体的各种物理量，就都成了空间坐标的连续函数。这样就可引用连续函数的解析方法，来研究流体处于平衡和运动状态下的有关物理参数之间的数量关系。

1.2 流体的主要物理性质

1.2.1 密度

密度是指单位体积内所具有的质量。对于均质流体，密度等于流体的质量与其体积的比值，即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——流体的密度(kg/m³)；

m ——流体的质量(kg)；

V ——流体的体积(m³)。

在热力学和气体动力学中，用比体积 v 来度量气体体积。比体积是指单位质量流体所具有的体积。对于均质流体，比体积 v 等于流体体积与其质量的比值，即

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-2)$$

由此可见，比体积与密度互为倒数，因此比体积的单位为m³/kg。

水的密度通常以4℃蒸馏水的密度来替代，即 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 。

又如对于温度为0℃，压力为1 atm (1 atm = 1.01325 × 10⁵ Pa) 的标准状态下的空气密

度为 $\rho_0 = 1.293 \text{ kg/m}^3$ ，空气的比体积为 $v_0 = \frac{1}{\rho_0} = \frac{1}{1.293} \text{ m}^3/\text{kg} = 0.773 \text{ m}^3/\text{kg}$

1.2.2 压缩性和温变膨胀性

流体在压力作用下，能改变自身体积的特性，称为流体的压缩性。当温度改变时，能引起流体体积变化的特性，称为流体的温度膨胀性。在这两种性质上，液体和气体差别很大，因此必须分别讨论。

一、液体的压缩性和膨胀性

(一) 压缩性

在温度不变的条件下，压缩性的大小，用体积压缩系数 κ 表示，其值为：

$$\kappa = -\frac{dV/V}{dp} \quad (1-3)$$

式中 V ——原有的体积(m^3)；
 dV ——体积的改变量(m^3)；
 dp ——压力的改变量(Pa)；
 κ ——体积压缩系数(Pa^{-1})。

因 dp 与 dV 的变化方向相反，即压力增加时体积减小，故上式中加一负号，以使系数 κ 永远为正值。一般对 0°C 的水来说，如初始压力为 5 atm ，则每增加 1 atm 时，水的体积只改变万分之 0.529 ，可见，水的可压缩性是很小的，其他液体的可压缩性也很小。

(二) 温变膨胀性

当温度升高时液体体积膨胀，温变膨胀性的大小用体积膨胀系数 β_t 表示，其值为：

$$\beta_t = \frac{dV/V}{dt} \quad (1-4)$$

式中 dt ——温度的改变量($^\circ\text{C}$)；
 β_t ——体积膨胀系数($^\circ\text{C}^{-1}$)。

实验指出，在 1 atm 下，在温度较低时($10\sim 20^\circ\text{C}$)温度每增高 1°C ，水的体积相对改变量仅为万分之 1.5 。温度较高时($90\sim 100^\circ\text{C}$)，也只改变万分之 7 。其他液体的 β_t 值也很小。

二、气体的压缩性

(一) 理想气体状态方程

当气体的压力或温度改变时，均将引起气体比体积、密度的显著变化。这些物理量之间的关系，服从理想气体状态方程，即

$$pv = RT \quad (1-5)$$

式中 p ——绝对压力(Pa)；
 T ——热力学温度(K)， $T = T_0 + t$ ， $T_0 = 273\text{K}$ 是标准状态下($t = 0^\circ\text{C}$)的热力学温度；
 R ——气体常数 $[\text{N}\cdot\text{m}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$ 。

气体常数 R 可由标准状态下的参数 $R_0 = \frac{p_0 v_0}{T_0}$ 来确定。对于空气，标准大气压 $p_0 = 101325\text{Pa}$ ，比体积 $v_0 = 0.773\text{m}^3/\text{kg}$ ， $T_0 = 273\text{K}$ ，代入得

$$R = \frac{p_0 v_0}{T_0} = \frac{101325 \times 0.773}{273} \text{N}\cdot\text{m}/(\text{kg}\cdot\text{K}) = 287 \text{N}\cdot\text{m}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

R 的物理意义是：质量为 1 kg 的气体在定压下加热升高 1°C 时所作的膨胀功。

(二) 等温过程

当气体状态变化过程中，温度保持不变时，称为等温过程。温度为常数时的理想气体状态方程可用波义耳(Boyle)定律表达如下：

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \quad (1-6)$$

上式表明，密度与压力成正比。凡是气体状态变化缓慢，或气流速度较低时，气体与外界能进行充分的热交换，而视为与外界温度相等，即可按等温过程处理。例如，缓慢充气或排气时，贮气罐中的气体就是缓慢压缩或缓慢膨胀过程，可视为等温过程。

(三)等压过程

在气体状态变化过程中，压力保持不变时，称为等压过程，由理想气体状态方程可得出盖·吕萨克(Gaylussac)定律如下：

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T_0 + t} = \frac{\rho_0}{1 + \beta t} \quad (1-7)$$

式中， $\beta = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$ ，为气体的体积膨胀系数。

上式表明，在等压过程中，密度与温度成反比。如热气流烘砂的气力输送系统中，压力变化较小而温度变化较大(一般由200℃降至50℃)，这类情况即可按等压过程处理。

(四)绝热过程

在气体状态变化过程中，与外界没有热交换，称为绝热过程。由热力学可知，绝热过程为

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/K} \quad (1-8)$$

式中 K ——绝热指数，为定压比热容 c_p 与定容比热容 c_v 的比值，对于空气 $K=1.4$ 。

气动震实造型机的震实缸，其进、排气过程进行得很快，气体来不及与外界进行热交换，这类问题即可按绝热过程处理。

除上述流体的两个主要物理性质外，流体的粘性将作为重点在本章以下各节阐述，流体的表面张力将在有关部分简要加以说明。至于流体的导电性、导热性等等，对于流体运动规律无直接影响，本书不作叙述。

1.3 流体流动的形态——层流与紊流

在流体流动过程中，因条件不同，具有两种性质完全不同的流动形态。

1.3.1 雷诺试验

1882年雷诺最早于圆管内进行了流体流动形态的试验。试验装置如图1-1所示。当水在圆管内的流速很小时，加入有色液体，则它将随水流共同前进而不与周围的水流混