

(京)新登字 039 号

内 容 提 要

本书是根据美国著名的ROBERT H. PERRY所著的《PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK》(第六版)译出。

中译本分上、下两卷出版。全书共分27篇。上卷包括第1至12篇,主要内容有:单位换算和各种数据表,数学,物理和化学数据,反应动力学,反应器设计,热力学,流体与颗粒力学,流体的输送与贮存,粉粒体的输送及固体和液体的包装,粉碎与团聚,能的利用、转化与储存,传热及传热设备,湿度测定法,蒸发冷却,致冷及深冷过程。

本书为全化工各行业通用的工具书,是指导化工、轻工、冶金等领域的科研人员,教学人员、生产人员进行过程研究开发,生产设备设计计算的必备手册。

ROBERT H. PERRY

PERRY'S CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK

SIXTH EDITION

McGraw-Hill

1984

PERRY化学工程手册

第 六 版

上 卷

责任编辑, 郭乃铎
陈 丽

封面设计, 韩 星

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里1号)

北京朝阳区东华印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

开本787×1092 1/16 印张112 3/4 字数2804千字

1992年2月第1版 1992年2月北京第1次印刷

印数 1—3000

ISBN 7-5025-1036-2/TQ·603

定 价145.00元

编辑说明

(1) 《PERRY化学工程手册》是一部在国际、国内具有较大影响的权威性工具书，对指导化工、轻工、冶金等行业的科研、设计和生产具有重要的参考价值。该书自1934年问世以来，经过五次修订再版。现将1984年第六版译成中文，介绍给广大读者。

(2) 由于计算机技术的迅速发展和被广泛采用，以及新的结构材料的开发利用，化学工程的理论和技术日益更新，新的另枝不断形成。为此，作者在第五版的基础上，对手册的内容作了大量修订和补充，不但对第五版的25篇逐一修正增补，并改写了经济、蒸馏、萃取和吸收各篇，还增加了生化工程技术和废物管理两篇新内容。另外，本版新收入的图、表、数据等以SI单位制表示，并增加了U.S.单位和SI单位的换算。

(3) 天津大学，浙江大学，清华大学，大连理工大学化工学院，石油大学，华南理工大学，成都科技大学，天津化工研究院的有关专家教授参加了翻译和审校工作。

(4) 参加本手册的编辑人员(以姓氏笔划为序)：刘哲、刘小蕓、李迟善、**李诵雪**、李洪勋、李建斌、朱振东、陈丽、陈逢阳、苗延秀、罗幼松、张红兵、张婉如、施承薇、周国庆、郭乃铎、徐世峰、梁虹、谢丰毅等。

总 目 录

上 卷

单位换算因子和各种数据表	1-1
数学	2-1
物理和化学数据	3-1
反应动力学, 反应器设计, 热力学	4-1
流体与颗粒力学	5-1
流体的输送和贮存	6-1
粉粒体的输送及固体和液体的包装	7-1
粉碎与团聚	8-1
能的利用、转化与储存	9-1
传热	10-1
传热设备	11-1
湿度测定法, 蒸发冷却, 致冷及深冷过程	12-1

下 卷

蒸馏	13-1
传质与气体吸收	14-1
液液萃取	15-1
吸附和离子交换	16-1
新的分离过程	17-1
液-气系统	18-1
液-固系统	19-1
固体干燥和气固系统	20-1
固-固体系和液-液体系	21-1
过程控制	22-1
结构材料	23-1
过程机器的传动	24-1
过程经济	25-1
废物管理	26-1
生化工程	27-1
索引	1

第 5 篇 流体与颗粒力学

作者:

Byron C. Sakiadis 流体与颗粒力学

译者:

黄祖棋 流体与颗粒力学

陆庆邦 本篇审校人

第5篇 目 录

5.1 流体力学导论	5-6
5.1.1 流体的性质	5-6
5.1.2 流体力学中的专用术语	5-9
5.2 流体静力学与压力测量	5-11
5.2.1 定义	5-11
5.2.2 液柱压力计	5-12
压力计的管子尺寸	5-13
5.2.3 倍率式压力计	5-13
5.2.4 机械式压力计	5-14
使用条件	5-15
5.2.5 压力计的标定	5-15
5.3 流量测量	5-16
5.3.1 静压力	5-16
一、局部静压力	5-16
二、平均静压力	5-16
三、测压管嘴的技术规格	5-17
5.3.2 速度计	5-18
一、皮托管	5-18
二、特殊的管子	5-19
三、风速计	5-19
四、求平均速度的横向布点测量	5-21
五、流动目测法	5-21
5.3.3 压头式流量计	5-23
一、一般原理	5-23
二、文丘里流量计	5-23
三、流量计喷嘴	5-24
四、临界流喷嘴	5-25
五、孔板流量计	5-26
六、弯头流量计	5-29
七、精度	5-29
5.3.4 面积式流量计	5-32
一、一般原理	5-32
二、转子流量计	5-32
5.3.5 质量流量计	5-33
一、一般原理	5-33
二、轴流横向动量质量流量计	5-33
三、推断式质量流量计	5-33
5.3.6 堰	5-34
5.3.7 两相系统	5-35
一、气-固混合物	5-35
二、气-液混合物	5-36
三、液-固混合物	5-36
5.4 流体动力学	5-37
5.4.1 能量平衡(衡算)	5-37
一、总能量平衡	5-37
二、机械能平衡	5-38
三、系统压力降的计算	5-38
5.4.2 动量平衡(衡算)	5-38
一、在平板上的射流冲击	5-39
二、作用在弯头上的力	5-39
三、喷射器	5-39
四、射流的特性	5-40
五、层流射流	5-42
5.4.3 在管内及流道内的流动	5-42
一、速度分布(圆形管)	5-42
二、速度分布(其它形式)	5-43
三、停留时间分布(化工容器)	5-43
四、不可压缩的流动	5-44
五、一般公式和方法	5-44
六、圆形管	5-44
七、非圆形管道	5-46
八、非牛顿型流体	5-48
九、非等温流动	5-51
十、明渠	5-52
十一、可压缩的流动	5-52
十二、湍流	5-52
十三、在水平管中的等温流动	5-54
十四、在水平管中的绝热流动	5-54
十五、通过渐缩-渐扩喷嘴(拉伐尔喷嘴)的流动	5-58
十六、层流流动	5-59
十七、滑移流动	5-59
十八、分子流动	5-60
十九、经济管径(湍流)	5-62
二十、经济管径(层流)	5-62
二十一、其它的压力损失	5-62

二十二、收缩与入口损失.....	5-63	四、有限大圆柱形表面.....	5-104
二十三、扩大与出口损失.....	5-65	五、连续的平面.....	5-104
二十四、锐孔与多孔板.....	5-67	六、连续的圆柱形表面.....	5-105
二十五、管件与阀门.....	5-68	5.4.9 液膜的夹带	5-106
二十六、弯头与弯管.....	5-71	一、平板.....	5-106
二十七、筛网.....	5-72	二、圆柱形表面.....	5-106
二十八、挡板.....	5-73	5.4.10 降膜.....	5-107
5.4.4 两相流动	5-74	一、最小润湿速度.....	5-107
一、液体与气体.....	5-74	二、层流.....	5-107
二、气体与固体.....	5-83	三、湍流.....	5-108
三、液体与固体.....	5-86	四、表面附着力的效应.....	5-108
5.4.5 流体分布	5-89	五、液泛.....	5-108
一、多孔管分布器.....	5-89	5.4.11 非稳态性状.....	5-109
二、窄缝式分布器.....	5-90	一、水击.....	5-109
三、导向叶片.....	5-91	二、水力瞬变过程.....	5-110
四、多孔板与筛网.....	5-91	三、脉动流.....	5-111
五、固体床.....	5-92	四、气相脉动的减幅.....	5-111
5.4.6 管排	5-92	五、液相脉动的减幅.....	5-111
一、湍流区.....	5-92	六、气穴.....	5-112
二、过渡区.....	5-95	5.4.12 模型研究.....	5-114
三、层流区.....	5-95	5.5 颗粒动力学	5-116
5.4.7 固体床	5-96	5.5.1 球形刚性颗粒	5-117
一、固定床.....	5-96	5.5.2 非球形刚性颗粒	5-118
二、塔填料.....	5-100	5.5.3 气泡	5-119
三、流化床.....	5-100	5.5.4 液体中的液滴	5-120
四、多孔介质.....	5-101	5.5.5 气体中的液滴	5-121
5.4.8 环绕物体的流动	5-102	5.5.6 应用	5-122
一、涡旋脱落.....	5-102	5.5.7 限制	5-122
二、边界层特性.....	5-103	5.5.8 颗粒的轨迹	5-126
三、有限大平板.....	5-103		

术语和单位

在这张表中,所用到的符号是以通用的方式来定义的并给出相应的SI制及美国惯用制的单位。以下标指明的专有定义则在本篇中使用的地方说明。本篇中用到的某些特殊的符号,只在使用的地方定义。

符号	定 义	SI制	美国惯用单位制	符号	定 义	SI制	美国惯用单位制
A	面积	m^2	ft^2	$N_{D\phi}$	迪思数	无因次	无因次
a	面积	m^2	ft^2	N_{Fr}	弗鲁特数	无因次	无因次
a	导管或渠道的宽度	m	ft	N_{Re}	雷诺数	无因次	无因次
a	系数,通用的			N_{We}	韦伯数	无因次	无因次
B	高度	m	ft	n	脉动频率	Hz	$1/s$
b	导管或渠道的高度	m	ft	n	常数,通用的		
b	系数,通用的			n	条款的数目	无因次	无因次
C	系数,通用的			p	压强	Pa	lbf/ft^2
C	传热率	m^3/s	ft^3/s	Q	热量	J	Btu
C_a	毛细管数	无因次	无因次	Q	体积	m^3	ft^3
c_p	恒压比热	$J/(kg \cdot K)$	$Btu/(lb \cdot ^\circ R)$	q	体积流率	m^3/s	ft^3/s
c_v	恒容比热	$J/(kg \cdot K)$	$Btu/(lb \cdot ^\circ R)$	R	气体常数	$8314 J/(K \cdot mol)$	$1545(ft \cdot lbf)/(mol \cdot ^\circ R)$
D	直径	m	ft	R	半径	m	ft
d	直径	m	ft	R	电阻	Ω	Ω
E	弹性模数	N/m^2	lbf/ft^2	R	液柱读数	m	ft
F	力	N	lbf	r	半径	m	ft
F	摩擦损失	$(N \cdot m)/kg$	$(ft \cdot lbf)/lb$	r	压力比	无因次	无因次
F	校正因子	无因次	无因次	s	比表面积	m^2/m^3	ft^2/ft^3
f	频率	Hz	$1/s$	s	液体头损失	无因次	无因次
f	摩擦因子	无因次	无因次	S	比能量损失	m/s^2	lbf/lb
G	质量速度	$kg/(s \cdot m^2)$	$lb/(s \cdot ft^2)$	S	速率	m^3/s	ft^3/s
g	当地重力加速度	m/s^2	ft/s^2	s	比焓	$J/(kg \cdot K)$	$Btu/(lb \cdot ^\circ R)$
g_c	有因次常数	$1.0(kg \cdot m)/(N \cdot s^2)$	$32.2(lb \cdot ft)/(lbf \cdot s^2)$	T	温度	$K(^{\circ}C)$	$^{\circ}R(^{\circ}F)$
h	液头,高	m	ft	t	时间	s	s
i	比焓	J/kg	Btu/lb	u	比内能	J/kg	Btu/lb
I	电流	A	A	u	速度	m/s	ft/s
J	热功当量	$1.0(N \cdot m)/J$	$778(ft \cdot lbf)/Btu$	V	速度	m/s	ft/s
K	指数,常数或流动参数			v	比容	m^3/kg	ft^3/lb
K	流体的体积弹性模数	N/m^2	lbf/ft^2	W	功	$N \cdot m$	$lbf \cdot ft$
k	比热之比	无因次	无因次	w	重量	kg	lb
L	长度	m	ft	w	重量流率	kg/s	lb/s
M	分子量	kg/mol	lb/mol	X	重量分率	无因次	无因次
m	质量	kg	lb	x	距离或长度	m	ft
m	厚度	m	ft	Y	膨胀因子	无因次	无因次
N	数据点或条款的数目	无因次	无因次	y	距离或长度	m	ft
N	摩擦阻力	无因次	无因次	Z	垂直距离	m	ft
N_s	斯特劳哈尔数	无因次	无因次	z	气体的压缩因子	无因次	无因次
				z	垂直距离	m	ft

续表

希腊文符号

符号	定 义	SI制	美国惯用单位制	符号	定 义	SI制	美国惯用单位制
α	粘性阻力系数	$1/m^2$	$1/ft^2$	λ	分子平均自由途径 长度	m	ft
α	角度	°	°	μ	粘度	Pa·s	lb/(ft·s)
β	惯性阻力系数	1/m	1/ft	ν	运动粘度	m^2/s	ft^2/s
β	直径之比	无因次	无因次	ρ	密度	kg/m^3	lb/ft^3
Γ	脉动强度	无因次	无因次	σ	表面张力	N/m	lbf/ft
δ	厚度	m	ft	σ_c	气穴数	无因次	无因次
e	壁面的粗糙度	m	ft	τ	剪切应力	N/m^2	lbf/ft^2
ε	孔隙率—自由体积分 率	无因次	无因次	ϕ	形状因子	无因次	无因次
η	粘度, 非牛顿型流体	Pa·s	lb/(ft·s)	ϕ	角度	°	°
θ	角度	°	°	ψ	球形度	无因次	无因次

5.1 流体力学导论

一般参考文献

Streeter, *Hand book of Fluid Dynamics*, McGraw-Hill, New York, 1961.

5.1.1 流体的性质

流体是一种物质, 当它受到切应力的作用时会发生连续的变形。真实的流体对这种变形所呈现的阻力称为粘度。对于气体和简单(低分子量)液体, 若静压力和温度固定不变, 则粘度为一常数, 这类流体称为牛顿型流体。

让我们考虑相距为 y 的两薄层液体, 如图5-1所示, 上层流体以相对于底层的速度 u 对底层作平行移动。对牛顿型流体来说, 要保持这样的移动需要一个压力 F , 它的大小由下式给出:

$$F = \mu u A / g_c y \quad (5-1)$$

以微分为准表示则

$$\tau = (\mu / g_c) (du / dy) \quad (5-2)$$

式中 μ = 流体粘度, τ = 切应力, g_c = 有因次常数, du / dy = 速度梯度, F, A, u 的定义见图5-1。

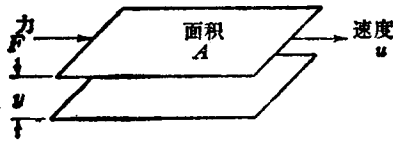


图 5-1 粘度的定义

因此粘度可以认为是动量传导系数, 类似于热传导中的导热系数和扩散传质中的扩散系数。

一个理想的或完全的流体是一个假想的气体或液体, 它对切应变不产生阻力, 因此粘度的值为零。所谓假想的理想流体不应与理想气体混淆起来。在大多数的流动问题中, 如果忽

略了粘度, 将会得到十分错误的结果。虽然在同一问题中理想气体的 P - V - T 关系常常可以安全地使用。

如果流体的粘度既是温度和压力的函数又是切应力或相当地是剪切速率($= du / dy$)的函数, 则这种流体称为非牛顿型流体。非牛顿型流体一般分为三大类: (1)其性质与剪切力作用时间无关, (2)其性质与剪切力作用的持续时间有关, (3)呈现出许多固体的特性。

见 Bird, Armstrong, and Hasager, *Dynamics of Polymeric Liquids*, vol. 1, *Fluid Mechanics*, Wiley, New York, 1977; Metzner, "Flow of Non-Newtonian Fluids," 载于Streeter(前引文献); Skelland, *Non-Newtonian Flow and Heat Transfer*, Wiley, New York, 1967。

1. 与时间无关 下面三种物料是属于这一类的:

a. 宾汉塑性流体大概是最简单的非牛顿型流体, 因为它们与牛顿型流体的区别仅仅在于它们的切应力与剪切速率的线性关系不通过原点。如图5-2中曲线B所示, 曲线表明要使这种流体开始流动需要一定的切应力 τ_0 。作为比较, 牛顿型流体的曲线如图中曲线A所示。

显示宾汉塑性特性的流体有,粘土的水悬浮液[Wilhelm, Wroughton and Loeffel, *Ind. Eng. Chem.*, 31, 622-629 (1939)], 颗粒的悬浮液[Binder and Busher, *J. Appl. Mech.*, 13, A101-A105 (1946)]和下水道淤浆[Caldwell and Babbitt, *Ind. Eng. Chem.*, 33, 249-256 (1941)]。

b. 假塑性物料包括大多数的非牛顿型流体。其中有聚合物溶液或熔融体和纸浆或颜料等悬浮液,其流动曲线的形式如图5-2中曲线c所示。

一般说,在一定的切变速率范围内,这种流动曲线可以在对数坐标图上用一条直线来近似表示,因而

$$\tau = K(du/dy) |du/dy|^{n-1} \quad \text{及 } n < 1 \quad (5-3)$$

其中 τ =切应力, du/dy =速度梯度, K =稠度指数, $N \cdot S^n/m^2$ [(lb $\cdot$ f $\cdot$ S n)/ft 2]; n =指数, 无因次。流体粘度由下式给出

$$\eta = g_c K |du/dy|^{n-1} \quad (5-4)$$

其中 η =粘度, Pa $\cdot$ S [(lb/(ft $\cdot$ s))]; g_c =因次常数。注意粘度的符号 μ 是专指牛顿型流体的。

具有如(5-3)式及(5-4)式所描述的流动曲线的流体称为乘方规律的非牛顿型流体。虽然这些方程式仅适用于一定的剪切速率的范围,但是适当选择物料常数 K 和 n 的数值,可以得到精确的流量预测。一般,在所考虑流动中最大的剪切应力(或剪切速率)不得超过(5-3)式最大剪切应力(或剪切速率)的应用范围。

c. 涨塑性物料显示出的流变特性和假塑性的相反。曲线(图5-2中D)表示这种流动曲线的典型形状。可以看出,表现粘度随剪切速度的增加而增加。

涨塑性物料的流动性质在一定的剪切速率的范围内可以用(5-3)和(5-4)式表示,其中 $n > 1$ 。淀粉浆或云母的水悬浮液,流砂和海滩沙等是涨塑性物料的例子。关于涨塑性悬浮体更广泛的讨论以及涨塑性物系的一览表见Bauer and Collins ("Thixotropy and Dilatancy"载于Eirich, *Rheology*, vol. 4, Academic, New York, 1967)、Green and Griskey[*Trans. Soc. Rheol.*, 12 (1), 13-25, 27-37 (1968)]和Griskey and Green [*Am. Inst. Chem. Eng. J.*, 17 725-728 (1971)]的著述。

2. 随时间而变的 包括那些剪切应力随剪切力作用的持续时间而变化的物料,而那些由于机械破碎或者由于颗粒破坏或分子键断裂而引起剪切应力变化的物料则不包括在内。

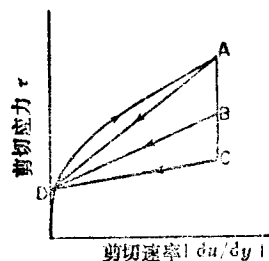


图 5-3 触变性流体的剪切应变图

AB的路径减小直至到达C点为止。超过C点,在该切变速率下,结构不再发生破坏。如果此

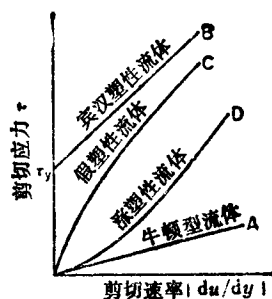


图 5-2 剪应变图

a. 触变性流体具有一种结构,这种结构的破坏是剪切时间的函数。随着这种结构在恒定的剪切速率下破坏,剪切应力减小。如果撤除外施加力的话,这种结构可以自行恢复。从旋转粘度计得到的触变性流体的切变图示于图5-3。闭合周线DAD内的面积是触变性数值大小的一个指标。如果在上方的曲线上到达A点后,保持剪切速率不变,则剪切应力将沿着

时剪切速率减小, 则剪应力沿下降曲线 CD 变化。任意条中间的下降曲线, 例如 BD 都是可能存在的。蛋黄酱、钻井用泥浆、油漆和油墨等是这种流体的一些例子。有关触变性物料的详细讨论以及触变性物系的一览表见Bauer and Collins载于Eirich前引文献。

b. 震凝性物料趋于聚集, 即当它受到周期性的振动或轻敲时, 其表观粘度迅速增加。膨润土溶胶, 五氧化二钒溶胶, 石膏在水中的悬浮体等是这种物料的例子。这种现象在恒剪切速率下已经被观察到(见Bauer and Collins载于Eirich前引文献)。

3. 粘弹性流体 这些流体显示出在流动中产生的变形有弹性复原的性质, 聚合物液体构成了这类流体中最大的一族。在这些流体的流动中除了通常的切向应力外, 还建立起正应力(即垂直于流动方向的应力)。这些正应力导致一些独特的现象产生, 例如“威森博格(Weissenberg)效应”, 在这种效应中, 流体有沿着在这种流体中的转动轴攀登的倾向。对于粘弹性流体的稳态非加速的流动, 由假塑性流体所导出的公式是可以使用的。这种流体的弹性通常表示为“端效应”。关于粘弹性流体流动性质的更详细的论述见Bird, Armstrong, and Hassager, 前引文献; Brodkey, *The Phenomena, of Fluid Motions*, Addison-Wesley, Reading, Mass, 1967; Eirich, *Rheology*, vols 1, 2, 3, 4和5, Academic, New York, 1956, 1958, 1960, 1967和1969, Frederickson, *Principles and Applications of Rheology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1964; Lodge, *Elastic Liquids*, Academic, New York, 1964; McKelvey, *Polymer Processing*, Wiley, New York, 1962; Metzner, “Flow Behavior of Thermoplastics”, 载于Bernhardt, *Processing of Thermoplastic Materials*, Reinhold, New York 1959; Middleman, *The Flow of High Polymers*, Interscience, New York, 1968。

非牛顿型流体流动理论在聚合物加工操作中的应用, 如混合、挤压、研光、纺丝、薄片成形等在Bernhardt, *Processing of Thermoplastic Materials*, Reinhold, New York, 1959; McKelvey, 前引文献, Middleman, *Fundamentals of Polymer Processing*, McGraw Hill, New York 1977; 和Wilkinson, *Non-Newtonian Fluids*, Pergamon, New York 1960, 等著作中都有论述。

在SI制中粘度(即绝对粘度)的单位是帕·秒(Pa·s)。1Pa·s等于10泊(P), 1000厘泊(CP)或0.672lb/(ft·s)。换算至其它单位的换算因子在第1篇中表1-4及1-7中给出。

密度为 ρ 及粘度为 μ 或 η 的流体的运动粘度是 $\nu = \mu/\rho$ 或 η/ρ 。运动粘度的单位称为沱(St), 等于 $1\text{cm}^2/\text{s}$ 。流度是粘度的倒数。

通常用来规定稀聚合物溶液的粘度的专门术语在Billmeyer, *Textbook of Polymer Science*, 2d ed, Wiley, New York, 1971, pp84—89和Eirich, *Rheology*, Vol, 4, Academic, New York, 1967, Chap 9中讨论。

有很多种粘度计可用于粘度的测量, 如毛细管、旋转式、锐孔式、落球式、摆动式粘度计等。它们在Van Wazer, Lyons, Kim, and Colwell, *Viscosity and Flow Measurement*, Interscience, New York, 1963一书中叙述。

在几种普通工业用的粘度计中, 运动粘度是根据一定体积的流体通过一个标准的毛细管或锐孔流出的时间来决定的。在这种仪器中, 入口和动力效应常常是流动阻力的一个重要部分。因此, 流出时间和运动粘度之间的关系是由实验确定的。

乘方规律的非牛顿型流体的物质常数 k 和 n 可以用旋转粘度计来决定(见Krieger and Maron, *J. Appl. Phys.*, 25, 72—75(1954); Metzner, “Non-Newtonian Technology,”

in Drew and Hoops, *Advances in Chemical Engineering*, Vol I, Academic, New York, 1956]。各种粘度计理论的讨论见Oka (Eirich, *Rheology*, Vol, 3, Academic, New York, 1960, Chap.2), Van Wazer et al, (前引文献) 和 Wohl[*Chem Eng*, 75(7), 99-104(Mar. 25, 1968)]。关于粘度测定的实用方面见Bowen[*Chem. Eng.*, 68(17), 119; (18), 131(1961)]。

有关粘度更详细的资料在第三节中的表内介绍, 亦可参阅 *International Critical Tables*, McGraw-Hill, New York, 1926—1933; *Wcast Handbook of Chemistry and Physics*, 59th ed., *Chemical Rubber*, Cleveland, 1978—1979, ppF49-F61; 和 Dean, *Lange's Handbook of Chemistry*, 12th ed, McGraw Hill, New York, 1978, pp10-99-10-116。当无法查到数据时, 常常可以对粘度进行合理的估计, 估计的方法汇总在第3篇中。

5.1.2 流体力学中的专用术语

如果流动不随时间而变, 则此流动称为稳定的, 即质量流率恒定, 并且所有其它的量(温度、压力、速度)与时间无关。相反地, 如果质量流率或者其它的量随时间而变, 则此流动称为非稳定的。非稳定流动可以是由于控制阀的作用, 往复式机器或不稳定的两相流引起的。

如果流动是非稳定的或者速度在总的流动方向上是变化的, 则此流动称为**加速的**。非牛顿型粘弹性流体的许多效应常常是在加速的流动中发生的。

如果一物流的形状和它的横截面的大小在整个流道内是相同的, 则此物流称为**均匀的**。当温度或速度在指定的瞬间, 在区域内的所有部分有相同的值, 则称温度或速度在整个区域上是均匀的。

物料在与通过设备的流动总方向相垂直的横截面的**平均质量速度** G 是流量的重量流率除以横截面的面积。通过一个截面积是均匀的流道时, 除非在流道内有物料的积聚或亏损, 平均质量速度是不变的。在研究通过管排或固体床的流动时, 重量流率除以密闭容器总的横截面(没有减去被障碍物所占的横截面积)所得的数量, 叫做**表观质量速度**。

物流通过任一指定的横截面积的**平均线速** V 通常是取相应的平均质量速度除以该截面处平均密度所得的值。除非流动是等温的, 仅当确定平均密度的规则是明确规定的, 平均线速才能得以解释。因此, 在处理非等温流动问题时, 尽可能使用质量速度一词, 表观线速相应于表观质量速度。

在一个广延的流体中, 或者装在刚性壁容器内的流体中**声速**或音速由下式给出

$$V_s = \sqrt{g_c \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s} = \sqrt{g_c k \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T} = \sqrt{\frac{K g_c}{\rho}} \quad (5-5)$$

式中 g_c = 有因次常数, p = 绝对压力, ρ = 流体密度, k = 比热的比值 C_p/C_v , 无因次, K = 流体的体积弹性模数, 下标 S 表示等熵, 下标 T 表示等温。对理想气体, $(\partial P/\partial \rho)_T = P/\rho = RT/M$, 其中 T = 绝对温度, R = 气体常数, M = 分子量。因此对理想气体 $V_s = \sqrt{g_c k RT/M}$ 。见Shapiro, *The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*, Vol. 1, Ronald, New York, 1953, pp45-48。

流速与声速之比称为**马赫数**, 马赫数小于1的流动称为亚音速的。速度头 $V^2/2g_c$ 是均匀速度为 V 的物流中动能的当量静压头。

热力学的术语如内能，焓，总热，熵等的定义，见第四篇。

雷诺数 N_R ，是具有 $LV\rho/\mu$ 形式的几个无因次量中的任意一个，它们都正比于流动系统中惯性力与粘性力之比。其中 L =流道的特性长度尺寸， V =线速， ρ =流体密度， μ =流体粘度。临界雷诺数相应于流速减小时由湍流流动向层流流动的转变。它的值与流道的几何尺寸有关，对圆形管约在2000~3000的范围内（见本节后面图5-28）。

对于非牛顿型流体，由湍流到层流的转变，是用后面（5-77）式定义的广义雷诺数来预测的。

流道的平均水力半径 R_H 等于流道中流体占有的那一部分横截面积除以润湿周边的长度。圆形管的水力半径是直径的四分之一，因此对非圆形渠道水力直径就是水力半径的4倍。对各种横截面的形式，见本节后面表5-8。

流线定义为一条线，在一给定时刻，流线在每一点上保持与流动相同的方向。层流定义为一种流动，其中的流线在它们的整个长度上彼此互不相混，只要能满足这一标准，就可以了，并不要求流线是直线或者是流动的穩定。这种运动型式也称为层流流动或滞流。

在 $N_R < 1$ 时的层流称为缓慢流或蠕流，在这种流动中，相对于粘性力来说惯性力可以略去不计。

如果在一个系统中雷诺数超过临界雷诺数，则发现流体的运动在整个流道内不是层流。漩涡在最初的不安定区中产生，很快地扩展到整个流体，因此破坏了整个流型。结果是湍动叠加在最初的平移运动上产生所谓湍流流动，湍动和湍流流动的补充知识，见Hinze, *Turbulence*, 2d ed., Mc Grow-Hill, New York, 1975; Schlichting, *Boundary-Layer Theory* 7th ed., McGraw-Hill, New York, 1979, pp.555-779。

5.2 流体静力学与压力测量

一般参考文献

Fluid statics. Baumelster, Marks' *Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 8th ed., McGraw-Hill, New York, 1978. Hansen, *Fluid Mechanics*, Wiley, New York, 1967. Kautman, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, New York, 1963. Streeter and Wylie, *Fluid Mechanics*, 7th ed., McGraw-Hill, New York, 1979. Vennard and Street, *Elementary Fluid Mechanics*, 5th ed., Wiley, New York, 1975.

Pressure measurement, general. ASME *Power Test Code*, Part 2, PTC 19.2-1964. Considine, *Process Instruments and Controls Handbook*, 2d ed., McGraw-Hill, New York, 1974. Doolittle, *Mechanical Engineering Laboratory*, McGraw-Hill, New York, 1957. Jones, *Instrument Technology*, vol. 1, 3d ed., Butterworth, London, 1974. Sweeney, *Measurement Techniques in Mechanical Engineering*, Wiley, New York, 1953.

Pressure measurement, specific. For absolute pressures below 3.5 kPa (0.5 lbf/in²) (about 1 inHg): Diels and Jaekel, *Leybold Vacuum Handbook*, Pergamon, New York, 1966. Leck, *Pressure Measurement in Vacuum Systems*, 2d ed., Chapman & Hall, London, 1964. Lewin, *Fundamentals of Vacuum Science and Technology*, McGraw-Hill, New York, 1965. Steinhert, *Handbook of High-Vacuum Engineering*, Reinhold, New York, 1963. Van Atta, *Vacuum Science and Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1965. For pressures over 140 MPa (about 20,000 lbf/in²): Bridgman, *The Physics of High Pressures*, G. Bell, London, 1949. Tongue, *The Design and Construction of High-Pressure Chemical Plant*, 2d ed., Van Nostrand, Princeton, N.J., 1959.

5.2.1 定 义

流体静力学是关于流体的静态性质和特性的学问。对液体来说，这门学科称为**流体静力学**，对气体来说它称为**气体力学**。

流体在静态平衡时，只受到压力。这一压力的强度用单位面积上的力表示，称为静压力。它垂直于它所作用的任意表面，而且，在任意指定的点上，不论表面的方位如何，它的大小均相同。这就是**帕斯卡定律** (Pascal's law) 的一种说法。另一种说法是在静止的流体中，所有方向上作用于任一点的压力强度是相同的。

表压是给定的流体压力与大气压力之差。压力表的读数通常是正的表压，真空表可以用来指示负的表压，即流体的压力小于大气压力。绝对压力是真正的总压力，它等于表压（取正负号）加上大气压力。

静压头一般是指在流体中，由于流体高于所讨论的点的位头而引起的压力。它的大小可用牛顿定律（力=质量×加速度）得出。对于液体（密度恒定），静压头 P_h Pa(lbf/ft²) 由下式给出

$$P_h = h\rho g/g_c \quad (5-6)$$

式中 h = 高于讨论的点的液头, m(ft); ρ = 液体密度; g = 当地的重力加速度及 g_c = 有因次常数。

动压是冲击压与静压头之差。对运动的流体，如不给定测压嘴相对于流动的位置和方向，就不能对压力计的读数作出有意义的解释。静压头和速度头之和称为总压头或总压，压力接头或静压计接头的规范在“静压力”分篇中给出。

5.2.2 液柱压力计

流体在连接于盛有流体的设备上开敞的垂直管上上升的高度或液头〔式(5-6)〕是测压点处压力大小的直接度量,也常常用于指示贮罐或容器中液面的高度。U形管压力计(图5-4a)和相当的仪表〔如图(5-4b)所示〕就是利用这一原理来测量流体的压力,所表示的是另一种流体(非被测流体)压头。大多数这种仪表可以是敞口式的或压差式的。这类仪表中读取液柱的测压流体可以是与受压流体不相互溶的任何液体。对于高真空或高压和大压力差的情况,压力计中使用密度大的流体,一般是水银;对低压和小压力差的情况则使用密度小的流体(例如,酒精,水或四氯化碳)。

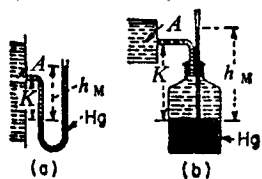


图 5-4 敞口式压力计

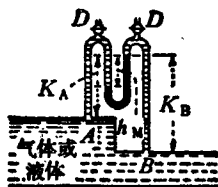


图 5-5 压差式U形管

敞口式U形管 (图5-4a) 和 **敞口式压力表** (图5-4b) 都指示出一个测压流体的读数 h_M m(ft), 如果测压流体与欲测压力的流体的界面比测压点A低 K m(ft), ρ_A 是后一种流体在A点处的密度, 及 ρ_M 是测压流体的密度, 则A点处的表压 P_A Pa(lbf/ft²) 为

$$p_A = (h_M \rho_M - K \rho_A) (g/g_c) \quad (5-7) \bullet$$

式中 g = 当地的重力加速度, g_c = 有因次常数, 在A点处的压头 h_A 以测压点处流体的高度 m (feet) 表示为

$$h_A = h_M (\rho_M / \rho_A) - K \quad (5-8) \bullet$$

当测量气体的压力时, 除非压力很高, ρ_A 较 ρ_M 小得很多, 因此公式中含有 K 的项可以忽略。

压差式U形管 (图5-5) 指示测压嘴A和B的压力差为

$$p_A - p_B = [h_M (\rho_M - \rho_A) + K_A \rho_B] (g/g_c) \quad (5-9)$$

式中 h_M 是U形管中测压流体的高度差, K_A 和 K_B 分别为测压流体较高界面高于A和B的垂直距离, ρ_A 与 ρ_B 分别为A和B处流体的密度, ρ_M 为测压流体的密度。如果任何一个测压嘴高于测压流体中较高的界面, 则相应的 K 将取负号。阀D是用来排放可能积存在这些高处的气体, 当压力计使用时, 它应保持关闭状态。

倒压差U形管, 其中的测压流体可以是气体或轻的液体, 可以用来测量液体的压差, 特别适用于固体容易沉淀出来的悬浮液的流动。关于这种压力计使用的更加详细的说明可以从 Doolittle 的著述 (前引文献 p. 18) 中得到。

封闭式U形管 (图5-6) 用水银做测压流体, 用于直接测量流体的绝对压力, 其条件是封密端与水银之间的空间是完全的真空。

●从测压嘴引到压力计的管线中是假定充满了与设备中在测压嘴位置处密度相同的流体。如果不是这种情况, 则 ρ_A 应是实际充满压力表管线内流体的密度并且给出的 h_A 必须乘以 ρ_A / ρ , 其中的 ρ 是需要测定其压头的流体的密度。

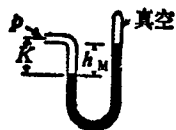


图 5-6 封闭式U形管

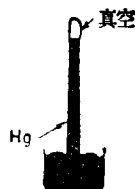


图 5-7 水银大气压力计

水银大气压力计 (图5-7) 用水银柱的高度直接指示大气的绝对压力。根据定义正常(标准)的大气压力是101.325kPa, 在其他单位中, 此压力的等量值是760mm汞柱 (在0℃), 29.921inHg (在0℃), 14.696(bf/in²) 和1atm。当压力计的读数表示为水银柱高度, 必须校正到标准温度(通常为0℃), 相应的温度校正因子在ASME PTC, 前引文献pp.23—26, 和Weast, *Handbook of Chemistry and Physics*, 59th ed, Chemical Rubber, Cleveland, 1978—1979, pp E39-E41给出。

压力计的管子尺寸

为了避免毛细现象的误差, 管子的尺寸应是足够地大而且测压流体应有这样的密度, 使其毛细管作用的影响与压力计读数相比应是可以忽略的。对内径为12.7mm (1/2in) 或更大的管子, 毛细管作用的影响实际上可以忽略(见ASME PTC, 前引文献p.15); 对U形管, 小的直径通常是允许的, 因为在一侧管中毛细作用引起的位移会被另一侧管中的位移所抵消。

浸没在液槽的敞口的垂直圆形截面管中, 毛细上升高度由下式给出:

$$h = \frac{4\sigma g_c \cos\theta}{gD(\rho_1 - \rho_2)} \quad (5-10)$$

其中 σ =表面张力, D =内径, ρ_1 及 ρ_2 分别为液体和气体(或轻液体)的密度, g =当地的重力加速度, g_c =有因次常数及 θ 为较重的流体所对的接触角。对大多数有机液体和水, 如果玻璃被液膜所润湿, 则对玻璃的接触角为零, 水银对玻璃, $\theta=140^\circ$ (*International Critical Tables*, Vol.IV, Mc Graw-Hill, New York, 1928, pp 434-435)。关于毛细作用的进一步的讨论, 见Schwartz, *Ind.Eng.Chem*, 61(1), 10-21(1969)。

5.2.3 倍率式压力计

用液柱压力计测量微小的压差, 欲得到必需的精度, 所用的方法通常必须设计成能放大读数的。下面的几种型式, 第二和第三种可以得到10倍的放大率, 第四种可多至30倍。一般地说, 放大的倍数愈大, 则在使用此种压力计时所要采取的措施必将愈加复杂, 这样提高的精度才不致是假象。

1. 更换测压流体 在敞口式的压力计中, 选用一种密度较小的流体。在压差式压力计中, 选用一种密度与被测流体密度之差尽可能小的流体。

2. 倾斜式U形管 (图5-8) 当直立的U形管换成倾斜的U形管时, 如果取读数 R m(ft) 如图所示而 R_0 m(ft) 是零读数, 代入 $h_M = (R - R_0)\sin\theta$ 后, 由上一节的公式便可算出($P_A - P_B$)。为了精确的测量, 压力计应进行标定, 因为管径和斜率可能有变化。

3. 差式压力计 (图5-9) 通常用于低气体压头的情况下, 这种压力计用一个容器作为

U形管的一侧，它比作为倾斜一侧的管子大得多。因此，在倾斜一侧的管中液面的变化在容器中只产生很小的液面变化。虽然 h_M 很容易由读数 R 和管子的尺寸算出，但最好还是要标定压力表。通常容器中液面的变化是不能忽略的，而且管径的变化会给计算带来很大误差。市售的压力计通常标有刻度直接给出以水柱的高度表示的 h_M ，装入管中的是一种特定的液体（通常不是水）。要是压力计中不是装入该特定液体，就无法知道此刻度是否正确，这就是频繁出现误差的原因。如果当压力表中液体密度是 ρ_0 时才能正确地读出刻度，而真正使用的流体密度是 ρ ，则读数必须乘以 ρ/ρ_0 。

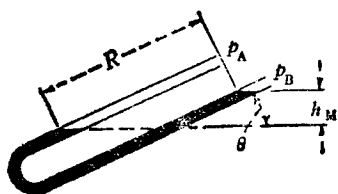


图 5-8 倾斜式U形管

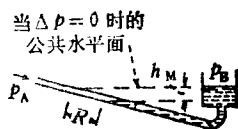


图 5-9 差式压力计

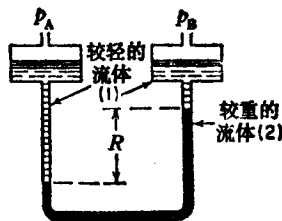


图 5-10 双流体U形管

4. 双流体U形管 (图5-10) 这是一种测量小气体压头的高灵敏度的仪表。设 A 是每一个容器的横截面积， a 是做成U形的管子的横截面积； ρ_1 是较轻流体的密度， ρ_2 是较重流体的密度，如果 R 是读数且 R_0 是压差为零时的读数，则压差为

$$p_A - p_B = (R - R_0)(\rho_2 - \rho_1 + \frac{a}{A}\rho_1) \frac{g}{g_c} \quad (5-11)$$

式中 g =当地的重力加速度及 g_c =有因次常数。

当 A/a 足够地大，(5-11)式中的 $(a/A)\rho_1$ 项与差值 $(\rho_2 - \rho_1)$ 相比可以忽略。但是，这一项不能不加考虑就随便略去。在使用(5-11)式时，仪表液体的密度要是从数据表查取，就很有可能引入严重的误差。因为每种液体可以溶解相当数量的另一种液体。在装入压力计之前，应将这两种液体一道摇晃，然后测定压力计使用温度下这两层液体的密度。如果试图获得高放大倍率，U形管应密封在恒温浴中，这样就可以精确地知道 $(\rho_2 - \rho_1)$ 。一般，如果需要得到最高的精度，压力计应该标定。

几种基于液柱原理并具有很高精度和灵敏度的测微压力计已被研制出来，用于测量微小的气体压力差和用于标定低量程的压力表。几种测微压力计已可在市场上买到。这些测微压力计避免了由于毛细作用引起的误差，同时除了核对微压力计的刻度外，不需要标定，见Doolittle前引文献，p.21。

5.2.4 机械式压力计

波登管压力表是由一端封闭，弯成圆弧形的椭圆管，在内压的作用下由曲率发生变化来指示压力的。在市场上能买到的这类压力表是用在低于大气压的各级压力和高于大气压直至700MPa(约100,000lbf/in²)的压力范围的。关于波登管压力表的详细资料由Harland[Mach. Des., 40(22), 69-74 (Sept, 19, 1968)]给出。

隔膜式压力表是靠薄膜（通常是金属的）两面受到压力差时所产生的挠曲来指示的。这