

CRANE®

ES, FITTINGS, AND PIPE

CRANE

and pressure drop
pipe:

due to flow is the same in a sloping,
horizontal pipe. However, the dif-
ference in pressure due to head
is considered in pr

CRANE

APPENDIX A - PHYSICAL PROPERTIES OF FLUIDS

Viscosity of
Liquid

流体 流经阀门、管件和管道的 流体计算

TP410

Flow of Fluids

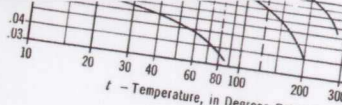
Through Valves, Fittings and Pipe

Technical Paper No.410M Metric Version

[美] CRANE工程部 编



化学工业出版社



013064731

0351.2
22

CRANE

流体 流经阀门、管件和管道的 流体计算

TP410

Flow of Fluids

Through Valves, Fittings and Pipe

Technical Paper No.410M Metric Version

[美] CRANE工程部 编



化学工业出版社

· 北京 ·



北航

C1672369

0351.2
22

013084731

本书内容包括流体在阀门、管道和管件内的流动计算，以及用调节阀控制流体，用压差流量计测量流量，泵在管道内输送流体等内容。实例丰富，大量公式便于计算查询。

本书是关于阀门、管道和管件中流体流动的技术手册，是工程师、设计师、维护人员和工程专业学生在设计流体系统方面不可或缺的资源。

图书在版编目 (CIP) 数据

流体 流经阀门、管件和管道的流体计算 TP410/[美] CRANE 工程部编. —北京: 化学工业出版社, 2013. 7

书名原文: Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe; Technical Paper No. 410M

ISBN 978-7-122-17641-7

I. ①流… II. ①C… III. ①流体动力学-计算方法 IV. ①0351.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 129761 号

Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe: Technical Paper No. 410M by the Engineering Department, Crane Co.

ISBN 1-40052-712-0

Copyright © 2009 by Crane Co. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Crane Co.

本书中文简体字版由 Crane Co. 授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分，违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号：01-2013-2808

责任编辑：张兴辉 韩亚南

装帧设计：王晓宇

责任校对：宋 夏

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 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 13½ 字数 252 千字 2013 年 8 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：98.00 元

版权所有 违者必究

前言

全球的工业化生产在 21 世纪不断扩大, 流体控制技术也在快速发展, 成为更为复杂的工艺流程及应用的核⼼。在 19 世纪, 水是唯⼀重要的流体, 用管道把水从⼀个地方输送到另⼀个地方; 今天几乎每一种可以想得到的流体都有通过管道应用在工艺生产、加工、运输上的实例。20 世纪 50 年代, 新的流体, 如液态金属: 钠、钾和铯, 及液态氧、液态氮等都被加入到当时常用管道输送的流体, 如油、水、酸和酒的行列中。随着技术不断更新, 太阳能发电及矿业浆液加工流程中的传热以及对新的化学复合物的应用, 使与流体系统有关的材料、结构、设计以及工艺过程的温度和压力等的范围都面临过去从未遇到过的苛刻挑战。流体输送不再是水力学中唯⼀考虑的因素。液压和气动机械被广泛地用于现代航空工程、海上船舶、自动控制设备、工具、工程机械、筑路设备、科学仪器和大型炼油设备等的精密控制系统。这些设备的自动控制需要精密的流体控制。

随着水力学和流体力学的广泛应用, 人们发现大部分工程学科都与水力学和流体力学有关。为了满足需要, ⼀本简单实用的有关流体在管道内流动的著作问世。Crane 公司在 1935 年首先发表了题为“流体的流动和传热”的小册子。1942 年出版技术论文 TP409 修订版, 称为“流体在阀门、管件、管道中的流动”。1957 年, 又推出⼀个全新的版本, 称为技术论文 TP410。在 TP410 中, Crane 公司力图列出当时最新的可以得到的有关流体流动的技术, 把所有解决流体流动问题所必需的资料集中⼀起。

1976 年版, 使用了一种全新的概念, 用当量长度 L/D 和阻力系数 K 表示阀门和管件的摩擦损失和管道的关系。使用当量长度, 这个变动对雷诺数在紊流区的流体计算结果影响很小; 然而, 对于层流区内流体流动的压降的影响比较大。用阻力系数 K 和当量长度 L/D 来替代流体通过阀门和管件的阻力损失, 这个概念的修改, 在⼀版中得到体现。本版中又增加了阀门和管件的类型。重要的修改还包括更新蒸汽黏度系数, 孔板系数和喷嘴系数。和以前的版本⼀样, 本版中使用了工程师们优先采用的线算图来解决简单的工程问题。

2009年版的Crane公司技术论文TP410中又增添了新的内容——流量控制和测量元件,流体处理的关键部件——泵和调节阀;还首次涉及流量计和更多的其他类型的阀门和管件。此外还增加了新的插图和更新了全部的内容,大量采用计算机在线计算替代传统的线算图。

最初,数据是通过Crane工程实验室进行阀门和管件的试验而得到的。在2009年新版的TP410中,Crane添加新的试验成果,增加了被试验阀门的数量来测定其阻力系数。此外,研究并收集和提供读者最新的水力计算方法。提供有关管件阻力的工业研究的新成果,本书提供了更多更新的计算方法,如更新的流体通过三通的计算方法,特别是增加了Y型三通管的内容。

2009年版本的技术论文TP410采用了最新的参考资料和规范来处理流体通过阀门、管件、管子、水泵、控制阀、流量计的计算。附录A流体特性已经更新,反映了当前最新的研究成果。

从1957年到现在,技术论文TP410已经有多个版本。每个版本都反映了当时最新的流体计算可利用的信息。这种不断更新,有益于我们的读者。流体计算的软件和不断更新的网站内容为用户提供电子计算工具以及最新的信息。我们欢迎您提出宝贵的意见和建议。

编者

目 录

符号说明	1
第一章 流体在管道中的流动理论	3
第一节 流体的物理特性	3
一、黏度	3
二、密度、比容和相对密度	5
三、蒸气压	6
第二节 流体在管内的流动——层流和紊流	6
一、流体的平均流速	7
二、Reynolds (雷诺) 数	7
三、非圆形导管	8
第三节 一般能量方程——Bernoulli (伯努利) 定理	8
第四节 压力测量	9
第五节 流体通过管道的压头损失和压降	10
一、摩擦系数	10
二、Colebrook (科尔布鲁克) 关系式	11
三、Colebrook 近似解法	12
四、水的 Hazen-Williams (黑曾-威廉斯) 公式	12
五、管道老化和对摩擦的影响	12
第六节 可压缩流体在管道内流动的原理	13
一、理想气体的定义	13
二、声速和马赫数	14
三、可压缩流体计算的途径	14
四、Darcy 公式应用在压缩流体的计算	15
五、完全等温等式	15
六、简化的等温气体管线等式	15
七、其他常用的可压缩气体长输管线的计算公式	16
八、可压缩气体长输管线计算式的比较	16

九、等温气体流动方程的修改	17
十、气体和蒸汽流动的极限	18
十一、简化的可压缩流动	19
十二、用软件计算压缩流的问题	19
第七节 蒸汽的一般讨论	20
第二章 流体在阀门和管件内的流动	21
第一节 管道系统中使用的阀门和管件的类型	21
一、阀门	21
二、管件	21
第二节 流体通过阀门和管件的压力降	22
第三节 Crane 流体试验装置	23
一、试验装置简述	23
二、Crane 水流试验	26
三、Crane 蒸汽试验	26
第四节 流体的流速和压降的关系	27
第五节 阻力系数 K 、当量长度 L/D 和流量系数 K_v	28
一、水力阻力	28
二、流体在阀门和管件内流动造成压头损失的原因	28
三、当量长度比	28
四、阻力系数	29
五、管系中串联和并联的阀门和管件的阻力系数	29
六、几何形状不相似的阀门及管件的阻力系数	29
七、几何形状类似的管件	31
八、不同表号管子 K 值的调整	32
九、流量系数 (K_v)	32
十、管道和管件的流量系数	33
十一、管系内串联和并联阀门和管件的流量系数	33
十二、层流工况	34
十三、根据雷诺数调整阻力系数	34
第六节 管道断面积的收缩和扩大	34
第七节 缩径阀座	35
第八节 弯管的阻力	36
一、二次流	36
二、流体流经弯管的阻力	37
三、斜接弯管的阻力	38

第九节	三通和 Y 型三通的水力阻力	38
一、合流		39
二、分流		41
三、用图形表示 $K_{\text{直流}}$ 和 $K_{\text{支流}}$		42
第十节	流体通过阀门、管件和管子的排放	43
一、不可压缩流体		43
二、可压缩流体		43
第十一节	阀门类型	43
第三章	用调节阀控制流体	47
第一节	调节阀	47
一、调节阀的部件		47
二、固有特性曲线		47
三、安装特性曲线		48
四、静压、动压和全压的关系		49
五、汽蚀、阻塞流和闪蒸		50
第二节	调节阀尺寸的计算和选择	51
一、不可压缩流体		51
二、可压缩流体		53
三、 C_v 与 K_v 的换算		54
第四章	用压差流量计测量流量	55
第一节	压差流量计	56
一、孔板		56
二、孔板适用范围		57
三、流量喷嘴		58
四、流量喷嘴适用范围		60
五、文丘里流量计		60
六、文丘里流量计适用范围		61
第二节	液体通过孔板、喷嘴和文丘里管的流动	62
一、测量压差 (dP)		62
二、永久压力损失 (NRPD)		62
三、排放系数 (C_d)		63
四、孔板		63
五、流量喷嘴		64
六、文丘里流量计		65
第三节	可压缩流体通过孔板、喷嘴和文丘里管	65

86	一、气体和蒸气的流动	65
88	二、膨胀系数 (Y)	65
111	三、孔板	65
131	四、流量喷嘴和文丘里流量计	65
141	五、可压缩气体通过喷嘴的最大流量	66
171	六、流体通过短管	67
	第五章 泵在管道内输送流体	68
	第一节 离心泵的运行	68
	第二节 离心泵的尺寸和选择	69
171	一、泵的性能曲线	69
171	二、可以得到的净正吸入压头 (NPSHa)	70
171	三、NPSHa 最佳化	70
181	四、黏度修正	71
181	五、泵流量、压头、功率和转速的关系	71
182	六、泵功率的计算	72
182	七、泵的选用	72
	第三节 容积式泵	73
	第六章 流体计算公式	75
182	一、基本换算	75
182	二、Bernoulli (伯努利) 定理	75
182	三、管内流动的平均速度 (连续方程)	75
182	四、不可压缩流体在直管中流动时的压头损失和压降	76
182	五、等温可压缩流体的计算公式	78
182	六、流体通过阀门和管件的压头损失和压降	79
182	七、流体通过孔板、喷嘴和文丘里管	81
182	八、调节阀尺寸计算	82
182	九、泵性能计算	83
182	十、液体的相对密度	84
182	十一、气体的相对密度	84
182	十二、理想气体方程	84
182	十三、当量水力直径关系式	85
	第七章 流体计算例题	86
182	第一节 阀门阻力计算 L、L/D、K 和流量系数 K_v	87
182	第二节 止回阀尺寸的确定	89
182	第三节 缩径阀出口的速度和流量	90

2 第四节	层流通过阀门、管件和管子	91
3 第五节	管系内的压降和速度	94
4 第六节	长输管线的流体计算	102
1 一、	简化绝热流动式 (见第六章)	103
2 二、	Weymouth 算式 (见第六章)	104
3 三、	Panhandle A 算式 (见第六章)	104
5 第七节	流体通过管系的排放	104
1 一、	修改过的 Darcy 算式	106
2 二、	声速连续方程	107
6 第八节	流体通过孔板流量计	109
7 第九节	流体计算中水力半径的应用	111
8 第十节	调节阀的计算	114
9 第十一节	流量计的计算	117
0 第十二节	泵计算例题	119
1 第十三节	三通和 Y 型三通计算	121
附录 A	流体的物性数据和阀门、管件和管道的流动特性	124
1 一、	蒸汽和水的黏度	124
2 二、	水和液态石油产品的黏度	125
3 三、	不同液体的黏度	126
4 四、	气体和蒸气的黏度	127
5 五、	制冷剂蒸气的黏度	128
6 六、	水的物性数据	128
7 七、	石油制品的相对密度和温度的关系	130
8 八、	不同液体的密度和相对密度	130
9 九、	气体的物性数据	131
10 十、	气体燃料的组分和相对密度	132
11 十一、	蒸汽等熵指数值	133
12 十二、	水在管道内流动的推荐流速	133
13 十三、	蒸汽在管道内流动的推荐流速	133
14 十四、	气体和蒸气的密度	134
15 十五、	饱和蒸汽和饱和水的物性	136
16 十六、	过热蒸汽的物性	146
17 十七、	过热蒸汽和高压水的物性	153
18 十八、	矩形锐边孔板和喷嘴的流量系数 C	155
19 十九、	净膨胀系数 Y 和临界压力比 r_c	158

1E	二十、可压缩流体的净膨胀系数 Y	159
1E	二十一、管道材料的相对粗糙度和全紊流时的摩擦系数	160
50E	二十二、任何类型的商业用管道的摩擦系数	160
80E	二十三、洁净商业用钢管的摩擦系数	160
40E	二十四、阀门和管件的阻力系数 K	160
附录 B 工程数据		170
10E	一、可压缩流体的质量流量和体积流量的换算	170
80E	二、绝对（运动）黏度的单位换算	170
70E	三、运动黏度的换算	172
90E	四、运动黏度和 Saybolt（赛氏）通用黏度	172
11E	五、运动黏度和 Saybolt（赛氏）糠醛黏度	174
4E	六、运动黏度、Saybolt 通用黏度、Saybolt 糠醛黏度和绝对黏度的换算	176
7E	七、API 度、Baume（波美）度、相对密度、密度的换算	177
9E	八、泵需要的功率	179
19E	九、单位换算	180
49E	十、水通过表号 40 钢管的流动	185
49E	十一、空气通过表号 40 钢管的流动	189
29E	十二、管子数据（碳钢和合金钢、不锈钢）	191
29E	十三、国际计量单位（SI）	202
参考文献		204
83E	.....	.....
83E	.....	.....
02E	.....	.....
08E	.....	.....
18E	.....	.....
58E	.....	.....
83E	.....	.....
83E	.....	.....
18E	.....	.....
18E	.....	.....
18E	.....	.....
83E	.....	.....
74E	.....	.....
83E	.....	.....
83E	.....	.....

符号说明

- A ——截面积, m^2
 a ——截面积, mm^2
 bp ——制动(轴)功率, kW
 C ——孔板和喷嘴的流量系数
 C_d ——孔板和喷嘴的排放系数
 C_V ——阀门和管件的流量系数(英制)
 c ——流体中的声速, m/s
 c_p ——定压比热容, J/(kg·K)
 c_v ——定容比热容, J/(kg·K)
 D ——内径, m
 D_H ——当量水力直径, m
 d ——内径, mm
 $d_{公称}$ ——管子或阀门的公称直径, mm
 E ——效率系数
 ep ——电功率, kW
 F_F ——液体临界压力比系数
 F_γ ——比热容比系数
 F_L ——液体压力恢复系数
 F_{LP} ——液体压力恢复系数和管道几何因数的联合
 F_P ——管道几何因数
 f ——Darcy 摩擦系数
 f_T ——完全紊流区的摩擦系数
 g ——重力加速度, $g=9.80665m/s^2$
 H ——全压或流体的能量, 米液柱
 h ——某点的静压, 液柱
 h_t ——饱和液体的热焓, kJ/kg
 h_{tg} ——蒸发潜热, kJ/kg
 h_g ——饱和蒸汽的热焓, kJ/kg
 h_L ——由于流体流动的静压头损失, m
 h_w ——静压头, 毫米水柱(mmH_2O)
 K ——阻力系数
 K_B ——伯努利系数
 K_V ——流量系数或流量因数(米制)
 L ——管子长度, m
 L/D ——流动阻力的当量长度, 用管径表示
 L_m ——管子长度, km
 M ——Mach(马赫)数
 M_r ——相对分子质量
 $NPSH_a$ ——可得到的净正吸入压头, m
 $NRPD$ ——不可恢复压降, Pa
 n_a ——气体的摩尔数
 P ——表压, Pa(g)
 P' ——绝压, Pa(a)
 P'_b ——标准工况下的绝压, $P'_b=101325$ Pa
 P'_c ——流体的临界压力, Pa(a)
 P'_t ——贮罐表面绝压, Pa(a)
 P'_v ——液体绝对蒸气压, Pa(a)
 P'_{vc} ——缩流断面处的绝压, Pa(a)
 p ——表压, bar(g)
 p' ——绝压, bar(abs)
 Q ——流量, L/min
 q ——流动工况下的体积流量, m^3/s
 q' ——标准工况下的体积流量 [MSC, 1.01325 bar(a) 和 $15^\circ C$], m^3/s
 q_d ——流动工况下的体积流量, $10^6 m^3/d$
 q'_d ——标准工况 MSC 下的体积流量, $10^6 m^3/d$
 q_h ——流动工况下的体积流量, m^3/h
 q'_h ——标准工况下的体积流量 (MSC), m^3/h
 q_m ——流动工况下的体积流量, m^3/min
 q'_m ——标准工况下的体积流量 (MSC), m^3/min
 R ——个别气体常数 $R=\bar{R}/M_r$, J/(kg·K)
 \bar{R} ——通用气体常数, $\bar{R}=8314.37$, J/(k mol·K)
 Re ——Reynolds(雷诺)数
 R_H ——水力半径, m
 r_c ——可压缩流体的临界压力比
 S ——在特定温度相对于水在标准工况

[MSC, 1.01325bar (a) 和 15°C] 的相对密度

S_g ——气体相对空气的相对密度, $S_g =$ 气体分子质量/空气的分子质量

T ——热力学温度, K

T_b ——标准工况下的热力学温度, $T_b = 288K$

t ——摄氏温度, °C

t_s ——给定压力下的饱和温度, °C

V ——流体的平均流速, m/min

\bar{V} ——流体的比容, m^3/kg

V_a ——容积, m^3

v ——流体的平均流速, m/s

v_s ——气体流动的声(或称临界)速度, m/s

W ——流量, kg/h

w ——流量, kg/s

w_a ——质量, kg

x ——压降比

x_T ——无管件时的临界压力降比率系数

x_{TP} ——有管件时的临界压力降比率系数

Y ——可压缩流体通过孔板、喷嘴、文丘里、调节阀或管道的净膨胀系数

Z ——潜在的压头或参考平面以上的高度, m

Z_t ——可压缩系数

Z_s ——泵吸入口高度, m

Z_t ——贮罐液面高度, m

α ——角度, (°)

β ——在管道内孔板和喷嘴, 以及管子直径的

扩大和缩小时小直径和大直径的比例

γ ——定压比热容 (C_p) 和定容比热容 (C_v) 的比值

Δ ——两点之间的差值

ϵ ——绝对粗糙度或管壁不平整高度, ft

η_m ——电动机效率

η_p ——泵效率

η_{vsd} ——变速驱动 (vsd) 效率

μ ——绝对(动力)黏度, cP (厘泊)

μ' ——绝对黏度, $Pa \cdot s$ (帕·秒)

ν ——运动黏度, cSt (厘斯)

ν' ——运动黏度, m^2/s

ϕ ——势能术语, 等温压缩流方程的高度变化

ρ ——流体的密度, kg/m^3

ρ' ——流体的密度, g/cm^3

ρ_a ——空气在标准状态下 [MSC, 1.01325bar (a) 和 15°C] 的密度

Σ ——求和

θ ——管道的扩大或收缩的角度

直径的下标 (1) ——较小的直径

直径的下标 (2) ——较大的直径

流体性质下标 (3) ——入口(上游侧)的工况

流体性质下标 (4) ——出口(下右侧)的工况

平均值的下标 (avg) ——平均值

第一章

流体在管道中的流动理论

通过管道系统输送流体是最常用的把流体从一个地方输送到另一个地方的方法。最常使用的管道是圆形截面，因为圆形截面不仅能提供比其他断面更高的结构强度，也比其他任何形状断面每单位周边长度提供更大的截面积。除非另有说明，“管道”在这本书中，均是指圆形截面和不变的内径。

只有几个特殊工况的流体流动（例如，管道内层流）可以完全用数学方法合理解决，其他的工况至少一定程度上需要用试验来确定系数。许多经验公式可以用于计算管内流体的流动，但这些应用往往有一定的限制，只可应用于使用条件和推导的计算公式的实验条件相同的工况条件下。

在现代工业生产过程中有各种各样的流体，若只用一个方程式来计算各种流体在管道中的流动，会使用很方便。这个方程就是 Darcy（达西）公式^①。

其中只有一个变量（摩擦系数），必须由实验进行确定。该公式在流体计算中有着广泛的应用并在本书中多处引用。

第一节 流体的物理特性

任何流体问题的解决都需要有被处理流体的物理性质的知识。流体的物理性质（即流体的黏度及密度）会影响流体的流动。人们制定了许多表格和图表列出常用的流体的物性数据，见附录 A。

一、黏度

黏性流体依靠外力的作用才能流动。黏性系数，或者简单来讲，流体的绝对

^① 达西公式也被称为 Welsback（韦耳斯拔）公式或达西-韦耳斯拔公式；被修正过的 Finning（芬宁）公式，其摩擦系数是达西摩擦系数的 1/4。

黏度，就是流体的内部抗剪切变形的阻力。糖浆是一种高黏性流体，水的黏度相对于水要低得多，而气体的黏度比水要小得多。

虽然大多数流体的黏度是能得到的，但某些流体在黏度测量前的情况会影响所得到的数据。印刷用油墨、木浆和西红柿酱为有这种黏度特性的代表性流体。

黏度的单位比较复杂，在计算时需要特别注意。在厘米克秒（CGS）系统中，绝对黏度的单位是泊（P），相当于 100cP（厘泊）。泊相当于达因·秒/每平方厘米（ $\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ ），或者克/（厘米·秒） $[\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})]$ 。为减少计算中的容易产生的单位混乱，人们用厘泊作为黏度的单位。由于大多数手册和表格都采用相同的处理方式，黏度以厘泊为计量单位，本书也不例外。

在国际计量单位制（SI）系统中运动黏度是帕 [斯卡]·秒（ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ），也可为牛顿·秒每平方米（ $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ）。水在 20°C 时的黏度如下^①：

$$\mu = 1\text{cP} = \begin{cases} 0.01\text{P} \\ 0.01\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}) \\ 0.001\text{Pa} \cdot \text{s} \end{cases}$$

$$\mu' = 1\text{Pa} \cdot \text{s} = \begin{cases} 1\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \\ 1\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}) \end{cases}$$

运动黏度是绝对黏度和密度的比值。在公制系统中运动黏度的单位是斯托克斯（St）， $1\text{St} = \text{cm}^2/\text{s}$ ， $1\text{St} = 100\text{cSt}$ （厘斯）。

$$v(\text{cSt}) = \frac{\mu(\text{cP})}{\rho'(\text{g}/\text{cm}^3)} = \frac{\mu}{S_{4^{\circ}\text{C}}} \tag{1-1}$$

根据定义，公制时这个相对密度 S 是基于 4°C 的水，而本书中的水密度基于 15°C。在公制系统中，运动黏度的单位是 m^2/s 。

绝对黏度和运动黏度间的公制和英制的转换见本书附表 B-1、附表 B-2。

测量流体的绝对黏度（特别是气体和蒸气的黏度）需要精密的设备和高超的实验技术。另一方面，油和其他黏稠的液体的动力黏度可用比较简单的试验装置来测量，使用的标准仪器是 Saybolt（赛波特）通用黏度计。用这个仪器测定运动黏度时，需测量少量的液体通过孔板的时间，称为液体的“赛氏黏度”以秒（s）为单位。对非常黏稠的液体，应采用赛氏糠醛黏度计（也有人称赛氏重油黏度计）来测得。

其他的黏度计和赛氏黏度计相似，但使用没有那么广，有 Engler（恩氏）黏度计，Redwood Admiralty（雷氏海军）黏度计和 Redwood（雷氏）黏度计。赛氏黏度和运动黏度间的换算关系见附表 B-3；运动黏度、赛氏通用黏度和赛氏糠醛黏

① 实际上 20°C 时水的黏度是 1.002cP。

度与绝对黏度的变换可查附图 B-2。

常用流体的黏度可见附录 A。当温度升高时，液体的黏度降低，而气体的黏度增加。压力对液体和理想气体黏度的影响很小，在大多数情况下没有实用意义，不需考虑。相反地，在附录 A 的蒸汽黏度表中可以看到压力对饱和或微量过热的蒸汽的黏度有相当大的影响。可惜的是蒸汽的数据不够完整，有些地方还有矛盾。因此，在计算除了蒸汽以外的其他气体时，因为缺少合适的的数据，只能暂时不考虑压力对气体黏度的影响。

二、密度、比容和相对密度

物质的密度就是单位容积的质量，在 SI 制单位中使用千克每立方米 (kg/m^3)，在本书中用符号 ρ 来表示。在 CGS 系统中使用克每立方厘米 (g/cm^3)，用符号 ρ' 表示。

比容 \bar{V} 是密度的倒数，在 SI 制单位中是 1kg 物质所占的容积立方米数，即

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

水的密度和温度的关系及其他物性数据见附表 A-2。其他常见液体的相对密度见附表 A-3。除非非常高的压力需要考虑外，压力对液体相对密度的影响微乎其微，可以不考虑。

气体和蒸汽的密度受压力变化的影响很大，理想气体的密度可以从下式计算得到：

$$\rho = \frac{P'}{RT} \quad (1-3)$$

某种气体的气体常数 R 可以用通用气体常数 $R = 8314.47$ 除以这种气体的相对分子质量 (M_r) 得到：

$$R = \frac{8314.47}{M_r} \quad (1-4)$$

气体的 R 值和其他一些气体常数可以从本书附表 A-4 中查阅，不同压力和温度下空气的密度见本书附表 A-6。

在计算蒸汽的流动时，常需使用密度和它的倒数，比容。这些常用的参数可在附录 A 的蒸汽特性表中查到。

相对密度和密度是相对应的，由于压力对液体密度的影响微不足道，故此时温度是考虑液体密度唯一需要考虑的因素。

液体的相对密度是液体在一定温度下的密度和标准状态 15°C 下水的密度的比值：

$$S = \frac{\rho(\text{除非指定, 液体在 } 15^\circ\text{C 时})}{\rho(\text{水在 } 15^\circ\text{C 时})} \quad (1-5)$$

可以用密度计直接测量液体的相对密度。常用的密度计有三种，API 密度计用于测定油类的相对密度，Baume（波美）密度计有两种，一种用于测量比水重的液体的相对密度，另一种用于测量比水轻的液体的相对密度。密度计读数和相对密度间的关系如下。

对油：

$$S(15.6^{\circ}\text{C}/15.6^{\circ}\text{C}) = \frac{141.5}{131.5 + \text{API 度}} \quad (1-6)$$

对比水轻的液体：

$$S(15.6^{\circ}\text{C}/15.6^{\circ}\text{C}) = \frac{140}{130 + \text{Baumé 度}} \quad (1-7)$$

对比水重的液体：

$$S(15.6^{\circ}\text{C}/15.6^{\circ}\text{C}) = \frac{145}{145 - \text{Baumé 度}} \quad (1-8)$$

为了计算的方便，可查阅附表 B-5 来转换不同密度计的读数。

气体相对密度的定义为气体相对分子质量和相对分子质量的比值，也是空气的气体常数与气体的气体常数的比值：

$$S_g = \frac{R(\text{空气})}{R(\text{气体})} = \frac{M_r(\text{气体})}{M_r(\text{空气})} \quad (1-9)$$

三、蒸气压

蒸气压是在一个特定温度下液体变成气体的绝对压力。对一个封闭容器内的液体在一定温度下其液体表面蒸发率等于蒸气的冷凝率，处于平衡状态。此时的蒸气压称为饱和蒸气压。在气体的绝压等于或低于它的饱和蒸气压时，液体就会产生气泡，蒸发。饱和蒸气压随流体温度的升高而升高。附表 A-2 列出了水蒸气的饱和蒸气压。

第二节 流体在管内的流动——层流和紊流

一个简单的实验可以看出在管道中流动的流体的截然不同的两种流动形式。实验中往透明玻璃管内流动的液体注入少量的彩色液体，观察注入后液体的流动状态。

当液体的流速不高时，注入的流体呈直线，如图 1-1 所示。当流速一点点增加时，注入的彩色液体还是呈直线，直到流速达到一定值，直线流突然改变，如图 1-2 所示。此时的速度称为“极限流速”。当速度高于此“极限”时，可以见到玻璃管中的彩色细线变成没有规则，呈紊乱状态，如图 1-3 所示。