

化工流体流动

西安交通

021.1

社

化工流体流动

[著] F. A. 霍 兰 得

[译] 王绍亭 李功样

西安交通大学出版社

化 工 流 体 流 动

〔英〕 F. A. 霍兰得 著
王 绍 亭 李 功 样 译
刘 衍 烈 校

西 安 交 通 大 学 出 版 社

内 容 提 要

本书按 F. A. 霍兰得所著《Fluid Flow for Chemical Engineers》一书译出。

全书分两篇共十四章。第一篇较详尽地阐述了不可压缩性牛顿型流体和非牛顿型流体在管内作稳态流动时的阻力及速度分布问题,对可压缩性流体在管内的流动也作了介绍。该篇还包括液体输送、搅拌、固体流态化及流量测量等方面的内容。第二篇叙述了流体流动中的向量方法,对于奈维-斯托克斯方程在各种坐标系中的表示方法作了介绍及推导,并对其在各种不同流动系统中的应用作了明晰的分析和讨论。全书编有大量的例题和习题,并采用国际单位制(SI)。

本书可作为化工各专业,同时也可作为机械、热工、环境等专业大学生和研究生的参考教材,还可供有关专业工程技术人员参考。

F. A. Holland

FLUID FLOW FOR CHEMICAL ENGINEERS

First published 1973

by Edward Arnold (Publishers) Ltd.

化 工 流 体 流 动

[英] F. A. 霍兰得 著

王 绍 亭 李 功 样 译

刘 衍 烈 校

责任编辑 贺 晓 鸿

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路 28 号)

西安交通大学印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 11 字数 254 千字

1985 年 10 月第一版 1985 年 10 月第一次印刷

印数 1—2,000 册

统一书号: 13340·045 定价 2.10 元

前 言

本书为大学生的流体流动基础教科书,是萨尔福得(Salford)大学化学工程学位课程的流体流动简明教材。全书采用 SI 单位制、分两篇编写。第一篇仅对流体流动作一般性处理,包括最低限度的数学分析内容,此篇可作为化学工程国家证书和国家文凭的课程。第二篇利用了向量分析及较深入的数学分析方法,在直角坐标系和柱坐标系上讨论了牛顿型液体的流动问题。在直角坐标系和柱坐标系上处理非牛顿型流体流动时,需应用张量,而张量仅在萨尔福得大学的硕士课程中使用,因此,在本教科书中被删去。显而易见,权用第二篇中的传递过程方法比利用第一篇中大量的经验方法更为有效。然而若想有效地运用传递过程方法,就必须清楚地了解问题的物理边界条件及工程状况。将第一、二两篇共同作为化学工程荣誉学位课程是适宜的;第一篇和第二篇中的大部分内容也可作为化学工程普通学位课程。

本书的材料也可用于为期一周的流体力学进修课,该课是萨尔福得大学化学工程系为化学工程师学会定期开设的。希望本书也能对化学工作者、机械工程师以及其它与流体流动有关的技术工作者有用。

作者认为,学好一门学科,没有任何方法能够代替广泛的阅读。然而,若能按照它的基本结构学习,就可较为有效地做到这一点。本书大量收集了具有突出、简明扼要特点的讲稿,写成了具有这样的结构形式。

巴伯拉·巴克利(Barbara Buckley)小姐曾为本书打印底稿,同事沃森(F. A. Watson)先生曾为本书作过校对和验算题目,作者对此表示感谢。此外,还得到了斯沃尔凯茵(J. Swolkein)先生的有益帮助;迪格戈里(P. Diggory)先生为本书绘了图,对此,作者亦表示衷心感谢。

F. A. 霍兰得

计 算 例 题 一 览 表

- 第一章 无
- 第二章 例(2.4-1)对于液体在管中流动时压力降的计算
例(2.4-2)对于管中液体流率的计算
- 第三章 例(3.4-1)对于管中一般与时间无关的非牛顿型液体的表观粘度、雷诺数和压力降的计算
例(3.6-1)对于符合指数定律液体在管中流动时表观粘度、雷诺数和压力降的计算
- 第四章 例(4.3-1)对于系统总压头与流量曲线数据的计算
例(4.4-1)对于同系列离心泵操作数据的计算
- 第五章 例(5.5-1)对于涡轮搅拌器在有挡板搅拌槽中功率的计算
例(5.5-2)对于涡轮搅拌器在无挡板搅拌槽中功率的计算
- 第六章 例(6.7-1)对于可压缩性流体在收缩喷嘴中流率的计算
例(6.8-1)对于压缩机所需功的计算
- 第七章 例(7.2-1)对于管中两相流压力降的计算
- 第八章 例(8.2-1)对于锐孔板中流率的计算
例(8.5-1)对于流量测量误差的计算
- 第九章 例(9.3-1)对于填充床中雷诺数和压力降的计算
- 第十章 例(10.1-1)对于液体由槽中排空所需时间的计算
例(10.2-1)对于气体由槽中排出所需时间的计算
例(10.4-1)对于运动的水平表面上不稳态情况下点速度的计算
- 第十一章 无
- 第十二章 例(12.5-1)对于水平表面上雷诺数和边界层厚度的计算
- 第十三章 例(13.4-1)对于水平同心套管环隙中流率的计算
- 第十四章 例(14.3-1)对于垂直管外液膜流率的计算

符 号 表

a 叶片宽度, m	A 面积, m^2
b 宽度, m	C Chezy 系数 $\sqrt{g/j_f}$, $m^{1/2}/s$
C 常数, 通常无因次	C 溶质浓度, kg/m^3
C_d 流量系数或曳力系数, 无因次	C_p 恒定压力下单位质量的热容, $J/(kgK)$
C_v 恒定体积下单位质量的热容, $J/(kgK)$	
d 直径, m	
d_{ep} 用于压力降计算时套管环隙的当量直径 $D_i - d$, m	
d_{eq} 用于传热计算时套管环隙的当量直径 $(D_i^2 - d_o^2)/d_o$, m	
D 直径, m	
$\frac{D}{Dt}$ 对时间的随体导数, 在直角坐标系中为:	$\frac{\partial}{\partial t} + v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z}$, s^{-1}
E 效率函数 $\left(\frac{1}{p_A/v}\right)\left(\frac{1}{t}\right)$, m^3/J	E 单位质量的总能量, J/kg 或 m^2/s^2
f 范宁(Fanning)摩擦系数, 无因次	F 为克服摩擦单位质量所需能量, J/kg
F 力, N	g 重力加速度, $9.81m/s^2$
G 质量通量, kg/sm^2	h 压头, m
H 高度, m	H 单位质量的焓, J/kg
i 单位矢量, 无因次	
I_T 方程(5.2-6)中单位时间槽内液体的翻转次数, s^{-1}	
j 单位矢量, 无因次	j_f 摩擦系数, 无因次
k 方程(6.2-8)中的指数, 无因次	k 方程(5.1-1)中的比例常数, 无因次
k 单位矢量, 无因次	K 稠度系数, $kg/(s^2 \cdot m)$
K 方程(2.5-3)中的参数, 无因次	K 方程(2.9-10)中的比例常数, 无因次
K_c Carmen-Kozeny 方程中的参数, 无因次	
K_p 管道流动的稠度系数, $kg/(s^2 \cdot m)$	K_e 动能流率, W
L 管的长度, m	L 方程(2.9-8)中的混合长, m
$\ln$ 自然对数, 无因次	$\log$ 常用对数, 无因次
m 流体质量, kg	m 数, 无因次
M 流体的流率, kg/s	(MW) 分子量 $kg/kmol$
n 数, 无因次	n 指数定律的指数, 无因次
n' 方程(3.1-1)中流动行为指数, 无因次	N 转速, rev/s
N_c 方程(6.2-5)中的压缩因数, 无因次	N_{FR} 弗劳德(Froude)数, 无因次
N_{HE} 赦兹特罗姆(Hedstrom)数, 无因次	N_M 马赫(Mach)数, 无因次
N_p 功率数, 无因次	N_{RE} 雷诺数, 无因次

N_{WE} 韦伯(Weber)数, 无因次	N_r 宾哈姆塑性流体的屈服数, 无因次
$NPSH$ 净正吸入压头, m	p 间距, m
P 压力, N/m ²	P_A 搅拌器功率, W
P_B 制动功率, W	P_E 功率, W
q 单位质量的热能, J/kg 或 m ² /s ²	Q 体积流率, m ³ /s
r 叶片长度, m	r 压力比, 无因次
r 半径, m	r_f 方程(6.6-8)中的回收因数, 无因次
R 剪应力, N/m ²	R_G 气体常数, 8.3143 kg/(kmol K)
s 距离, m	s 方程(8.5-1)的标尺读数, 无因次
s 斜率 $\sin\theta$, 无因次	s 拉普拉斯变换参数, s ⁻¹
S 流通横截面积, m ²	S_0 单位体积的表面积, m ⁻¹
t 时间, s	T 温度, K
T_c 方程(6.6-7)中的临界滞流温度, K	TS 端末速度, m/s
u 平均线速度, m/s	u_p 沉降速度或悬浮速度, m/s
U 单位质量的内能, J/kg 或 m ² /s ²	v 线速度, m/s
V 体积, m ³	V 单位质量的体积, m ³ /kg
w 重量分数, 无因次	W 单位质量的功, J/kg 或 m ² /s ²
x 距离, m	x 方程(5.4-5)中的指数, 无因次
x_s 固体的体积浓度, 无因次	
X_{LM} 方程(7.2-8)中的 Lockhart Martinelli 参数, 无因次	
y 距离, m	y 方程(5.4-5)中的指数, 无因次
Y_1 方程(6.7-16)中的膨胀因数, 无因次	z 距离, m
α 方程(1.6-7)中的速度分布因数, 无因次	
α 存留时间的倒数, Q/V, s ⁻¹	γ 热容比 C_p/C_v
$\dot{\gamma}$ 剪切速率, s ⁻¹	δ 边界层厚度, m
s 管的粗糙度, m	s 空隙度分数, 无因次
η 运动粘度, m ² /s	η 方程(5.2-2)中的效率因数, 无因次
θ 角度或斜率, 无因次	μ 流体的动力粘度, kg/(sm) 或 Ns/m ²
ρ 流体密度, kg/m ³	σ 表面张力, N/m
τ 转矩, Nm	ϕ 方程(5.4-6)中的功率函数, 无因次
ϕ 方程(7.2-9)中的 Lockhart Martinelli 参数, 无因次	
ψ 方程(9.1-10)中的修正因数, 无因次	
ω 角速度, rad/s	Δe 方程(8.5-5)中的百分误差, 无因次
∇ 算子, 在直角坐标系中为:	

$$i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}, \text{ m}^{-1}$$

∇^2 拉普拉斯算子, 在直角坐标系中为:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \text{ m}^{-2}$$

下 标

a	表观	A	搅拌器
b	填充床	B	屈服应力
c	粗粒悬浮体, 螺旋管, 收缩或临界	d	排出侧
D	位移 (排量)	e	涡流, 当量或膨胀
f	摩擦力	G	气体
i	管内	L	液体
m	压力计液体, 平均值或数	M	混合
n	数	o	管外或水平面
p	管或固体颗粒变	r	简化 (对比)
s	声音, 流束, 吸入一侧或系统	t	时间或瞬时
T	槽或总	vp	蒸汽
V	体积	w	管或管壁
W	水		

目 录

计算例题一览表

符 号 表

第一篇 流体流动基础

第一章 流体的运动

1.1	单位和因次	(1)
1.2	流型	(1)
1.3	牛顿粘性定律和动量传递	(2)
1.4	非牛顿型流体的特性	(3)
1.5	边界层	(6)
1.6	能量关系和柏努利方程(Bernoulli equation)	(6)

第二章 不可压缩性牛顿型流体在圆管和槽渠中的流动

2.1	雷诺数(Reynolds number)与管中流体流动的流型	(9)
2.2	压力降与管壁剪应力的函数关系	(9)
2.3	管中剪应力的变化	(10)
2.4	管中摩擦系数、压力降与雷诺数的函数关系	(10)
2.5	管件和弯管的压力降	(14)
2.6	非圆形管的当量直径	(15)
2.7	管中层流时的速度分布	(15)
2.8	管中湍流时的速度分布	(18)
2.9	管中湍流时的通用速度分布	(19)
2.10	管中流动特性与速度梯度之间的函数关系	(21)
2.11	明渠中的流动	(22)

第三章 不可压缩性非牛顿型流体在管中的流动

3.1	与时间无关的非牛顿型流体在管中的流动	(24)
3.2	与时间无关的非牛顿型流体在管壁面处的剪切速率	(25)
3.3	与时间无关的非牛顿型流体在管中层流时的压力降	(27)
3.4	与时间无关的非牛顿型流体在管中湍流时的压力降	(27)
3.5	宾哈姆塑性流体(Bingham-Plastic fluids)在管中层流时的压力降	(29)
3.6	符合指数定律的流体在管中的流动	(30)
3.7	符合指数定律的流体在管内作层流流动时的速度分布	(33)

3.8	符合指数定律的流体在管内作湍流流动时的速度分布·····	(34)
3.9	对于符合指数定律的流体的膨胀和收缩损失·····	(34)

第四章 液体的泵送

4.1	泵和泵送·····	(36)
4.2	系统压头·····	(36)
4.3	离心泵·····	(37)
4.4	离心泵的性能关系·····	(42)
4.5	离心泵的串联与并联操作·····	(44)
4.6	正排量泵·····	(46)
4.7	泵送效率·····	(47)
4.8	泵的选择因素·····	(48)

第五章 槽中液体的混合

5.1	混合器和混合·····	(49)
5.2	小叶片高速搅拌器·····	(50)
5.3	大叶片低速搅拌器·····	(52)
5.4	混合的无因次数群·····	(53)
5.5	功率曲线·····	(54)
5.6	液体混合系统的放大·····	(58)
5.7	搅拌槽系统中溶质的清除·····	(60)

第六章 管中可压缩性流体的流动

6.1	能量关系·····	(63)
6.2	状态方程·····	(65)
6.3	流体的音速·····	(66)
6.4	水平管中理想气体的等温流动·····	(67)
6.5	水平管中理想气体的非等温流动·····	(69)
6.6	水平管中理想气体的绝热流动·····	(70)
6.7	理想气体通过水平缩颈导管的绝热流动·····	(72)
6.8	气体的压缩和压缩机·····	(77)

第七章 管中气液两相混合物的流动

7.1	气液两相流动的流型·····	(80)
7.2	两相呈湍流时压力降的预测方法(根据 Lockhart-Martinelli 法) ·····	(80)

第八章 流量的测量

8.1	流量计及流量的测量·····	(84)
8.2	封闭管道中的压头式流量计·····	(85)

8.3	敞口管道中的压头式流量计·····	(89)
8.4	机械流量计及电磁流量计·····	(91)
8.5	流量测量的标度误差·····	(92)

第九章 有固体颗粒存在时的流体运动

9.1	流体与单一颗粒间的相对运动·····	(95)
9.2	流体与颗粒群间的相对运动·····	(96)
9.3	流体通过填充床的流动·····	(98)
9.4	流态化·····	(100)
9.5	淤浆的输送·····	(101)
9.6	过滤·····	(103)

第十章 流体不稳态流动导论

10.1	槽中液体排空所需的时间·····	(104)
10.2	理想气体由槽中排空所需的时间·····	(106)
10.3	球形固体颗粒以层流流动在牛顿型流体中的降落速度达到 其最终速度的99%时所需的时间·····	(109)
10.4	在牛顿型液体中当平板突然进行加速时的运动·····	(110)

第二篇 流体流动中的向量方法

第十一章 流体流动的中向量法以及连续性方程和动量传递方程

11.1	流体流动中的向量·····	(114)
11.2	在直角坐标系中两个向量的标积·····	(114)
11.3	在直角坐标系中两个向量的向量积·····	(115)
11.4	在直角坐标系中的向量算子—— ∇ 算子·····	(116)
11.5	关于直角坐标系中流体流动连续性方程的推导·····	(116)
11.6	随体导数与其它形式的连续性方程·····	(118)
11.7	在直角坐标系中的拉普拉斯算符·····	(118)
11.8	柱坐标系·····	(119)
11.9	在柱坐标系中流体流动的连续性方程·····	(120)
11.10	关于在直角坐标系中对于通用动量传递方程的推导·····	(120)

第十二章 关于直角坐标系中简化的奈维-斯托克斯方程

	(<i>Navier Stokes equation</i>)的应用·····	(123)
12.1	在直角坐标系中简化的奈维-斯托克斯方程 ·····	(123)
12.2	牛顿型液体的稳态水平层流·····	(124)
12.3	两块无限大平行板间牛顿型液体的稳态水平层流·····	(125)

12.4	牛顿型液体在水平平板上的稳态边界层流动·····	(126)
12.5	牛顿型液体在水平平板上作稳态层流时的边界层厚度·····	(128)
12.6	牛顿型液体在水平平板上作稳态湍流时的边界层厚度·····	(131)
12.7	牛顿型液体的稳态垂直层流流动·····	(133)
12.8	牛顿型液体液膜沿垂直壁面的稳态层流流动·····	(134)

第十三章 关于在水平柱坐标系中简化的奈维-斯托克斯方程的应用

13.1	水平柱坐标系中简化的奈维-斯托克斯方程·····	(136)
13.2	无角速度或径向速度时牛顿型液体的稳态水平层流·····	(136)
13.3	在水平管中牛顿型液体的稳态层流·····	(137)
13.4	水平同心套管环间牛顿型液体的稳态层流·····	(138)
13.5	在无压力梯度作用下, 内圆柱体以恒速运动时水平同心套管环间 牛顿型液体的稳态层流·····	(140)
13.6	在有压力梯度作用下, 内圆柱体以恒速运动时水平同心套管环间 牛顿型液体的稳态层流·····	(141)
13.7	水平管中牛顿型液体的不稳态层流·····	(142)

第十四章 关于垂直柱坐标系中简化的奈维-斯托克斯方程的应用

14.1	垂直柱坐标系中简化的奈维-斯托克斯方程·····	(148)
14.2	无角速度或径向速度时牛顿型液体的稳态垂直层流·····	(148)
14.3	牛顿型液体在垂直管的外壁面上以液膜方式下降时的稳态层流·····	(149)
14.4	无垂直速度或径向速度时牛顿型液体围绕垂直轴作 稳态层流的旋转流动·····	(151)
14.5	牛顿型液体在同轴的以不同角速度旋转的垂直 圆筒间作稳态层流旋转流动·····	(152)
14.6	产生抛物面时的牛顿型液体的稳态层流旋转流动·····	(153)

换算系数·····	(155)
-----------	---------

附 录·····	(156)
-------------	---------

补充习题·····	(156)
-----------	---------

习题答案·····	(162)
-----------	---------

第一篇 流体流动基础

第一章 流体的运动

1.1 单位和因次

质量、长度和时间通常被用来作为基本单位，它们的因次分别记为 M 、 L 和 T 。其它单位均可利用质量、长度和时间导出。在国际单位制（通称为 SI 单位制）中，基本单位为公斤(kg)、米(m)及秒(s)。表(1.1-1)中列出了一些导出单位。

虽然 SI 在单位制中以摩尔作单位表示物质的量，但为了便利和一致性，本书采用了 kmol。

表 (1.1-1)

量	导出单位	符 号	与基本单位的关系
力	牛顿	N	kgm/s^2
功、能量、热量	焦耳	J	N m
功率	瓦特	W	J/s
面积	平方米		m^2
体积	立方米		m^3
密度	公斤每立方米		kg/m^3
速度	米每秒		m/s
加速度	米每秒平方		m/s^2
压力	牛顿每平方米		N/m^2
表面张力	牛顿每米		N/m
动力粘度	牛顿秒每平方米		Ns/m^2 或 kg/(sm)

1.2 流型

一般，在与流动方向相垂直的直线各点上，运动流体具有不同的流速。任一速度分布，与流动特性有关；而后者又是容器几何形状、流体物理性质以及流体质量流率的函数。

对于大多数情况，流动可以层流或湍流来表征。

层流 层流流动亦称为粘性流动或流线流动。在此种型式的流动中，各流层之间仅存在相对运动，不存在任何宏观的互相混合。层流系统通常可采用流线图来表示。流体不能穿过流线流动。粘滞摩擦力所产生的剪应力形成了层流流动的速度分布。

湍流 在湍流流动中,流体会在主流动方向的横向方向上作不规则的任意运动。这种不规则脉动可视为平均运动的附加运动。

现在在直角坐标系 x, y, z 方向上考察流体的流动。点在 x 方向上任一瞬时的速度可写成:

$$v_x = \bar{v}_x + \bar{v}'_x$$

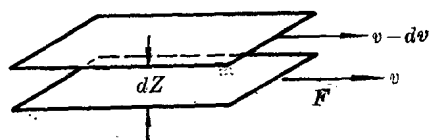
式中, $\bar{v}_x$ 为平均速度, 由下式定义:

$$\bar{v}_x = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} v_x dt \quad (1.2-1)$$

式(1.2-1)中, Δt 为时间间隔, 由于不规则脉动十分速度, 故所取时间间隔 Δt 仅为几秒即可。如果平均速度 $\bar{v}_x$ 不随时间而变, 则 x 方向上的运动即称为稳态流动。如 y, z 方向上亦有流体的运动时, 则该两方向上流体的运动速度亦可表示成为相应的平均速度和脉动速度之和。

1.3 牛顿粘性定律和动量传递

如图(1.3-1)所示, 设想有两块面积为 A , 距离为 dz 的平行平板, 两板空间为液体所充满。下板以速度 v 移动, 上板以速度 $v - dv$ 移动, 由于两板间存在有微小的速度差 dv 及板面上流体粘性摩擦的影响, 会使得板面积 A 受到一个阻力 F 的作用。



图(1.3-1) 两板间的剪切作用图

于是, 上述的力 F 也必作用于下一块板, 以维持两板间的速度差 dv 。

单位面积上所受的力 F/A , 称为剪应力 R 。

由于速度 v 随距离 z 的增加而减小, 故速度梯度为负, 写成 $-dv/dz$ 。

牛顿粘性定律表明剪应力 R 与流体中的速度梯度 $-dv/dz$ 成正比。其中, 比例常数 μ 称为动力粘度系数。牛顿粘性定律可写成:

$$R = -\mu \frac{dv}{dz} \quad (1.3-1)$$

凡遵循这一方程规律的流体称为牛顿型流体, 不遵循这一方程规律的流体称为非牛顿型流体。

对于 z 方向上的任一点, 其沿 x 水平方向的速度为 v_x 时, 方程(1.3-1)可改写成下述形式:

$$R_{zx} = -\mu \frac{dv_x}{dz} \quad (1.3-2)$$

或对于径向 r 方向上的任一点, 可写成如下形式:

$$R_{rx} = -\mu \frac{dv_x}{dr} \quad (1.3-3)$$

牛顿粘性定律适用于呈流线流动的牛顿型流体。对于呈流线流动的牛顿型流体, 其速度梯度 $-dv/dz$, 依习惯亦称为剪切速率, 记为 $\dot{\gamma}$ 。

牛顿粘性定律通常可用下列三种形式之一写出:

$$R = \mu \dot{\gamma} \quad (1.3-4)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{R}{\mu} \quad (1.3-5)$$

或:

$$\mu = \frac{R}{\dot{\gamma}} \quad (1.3-6)$$

即:

$$\text{动力粘度} = \frac{\text{剪应力}}{\text{剪切速率}}$$

在层流流动的流体中, 快速运动的分子扩散到慢速运动的流体中或相反, 其结果是在与流动方向相垂直的方向上生产动量传递。动量传递速率与式(1.3-2)给出的剪应力 R_{xz} 相同。

式(1.3-2)也可写成:

$$R_{xz} = -\eta\rho \frac{dv_x}{dz} \quad (1.3-7)$$

式中, $\eta = \mu/\rho$ 称为粘滞扩散系数或运动粘度。

在湍流流动中, 涡流运动被强加于一般分子运动中而发生动量传递, 通过湍流区的动量传递速率可由下式表示:

$$R_{xz} = -(\eta + \eta_e)\rho \frac{dv_x}{dz} \quad (1.3-8)$$

式中, η_e 为涡流粘滞扩散系数。由于湍流流动中, 涡流粘滞扩散系数 η_e 较分子粘滞扩散系数 η 大得多, 因此, 在湍流流体中剪应力要大的多。

1.4 非牛顿型流体的特性

对于牛顿型流体, 在直角坐标系中标绘出的剪应力 R 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 之间的关系是一条斜率等于动力粘度 μ 的直线。对许多流体, R 与 $\dot{\gamma}$ 的标绘关系并非一条直线, 这些流体即所谓非牛顿型流体, 此时, R 与 $\dot{\gamma}$ 的关系曲线可利用粘度计由实验确定。

对于非牛顿型流体, 若不将粘度与一个特定的剪切速率 $\dot{\gamma}$ 联系起来, 粘度将失去意义。表观粘度 μ_a 可定义如下:

$$\mu_a = \frac{R}{\dot{\gamma}} \quad (1.4-1)$$

如图(1.4-1)所示, 当表观粘度 μ_a 随剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的增加而下降时, 此种流体称为假塑性流体 (Pseudoplastic fluids); 又如图 (1.4-2) 所示, 当 μ_a 随 $\dot{\gamma}$ 的增加而增加时, 此种流体称为胀塑性流体 (Dilatant fluids)。

另一类非牛顿型流体为宾哈姆塑性流体 (Bingham-plastic fluids)。如图(1.4-3)所示, 在直角坐标系上标绘出宾哈姆塑性流体 R 与 $\dot{\gamma}$ 的关系为一条在剪应力轴上截距为 R_B 的直线。 R_B 称为屈服应力, 必须超过它流体才能开始流动。当流体静止时, 它的三维结构具有足够的刚性来抵抗比屈服应力为小的任何应力作用。当屈服应力被超过时, 在剪应力 $R - R_B$ 作用下, 流体系统显示出与牛顿型流体相同的行为。对于宾哈姆塑性流体, 其表示剪应力与剪切速率关系的直线的斜率称为刚度系数。

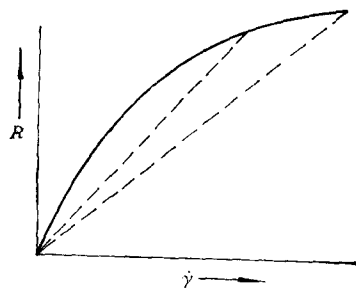


图 (1.4-1) 假塑性流体的剪应力 R 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的关系图

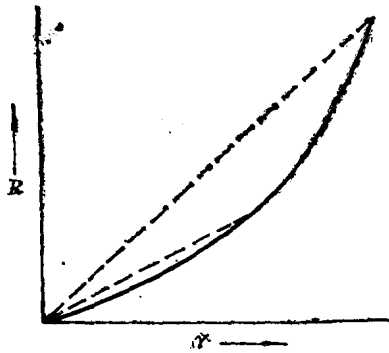


图 (1.4-2) 胀塑性流体的剪应力 R 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的关系图

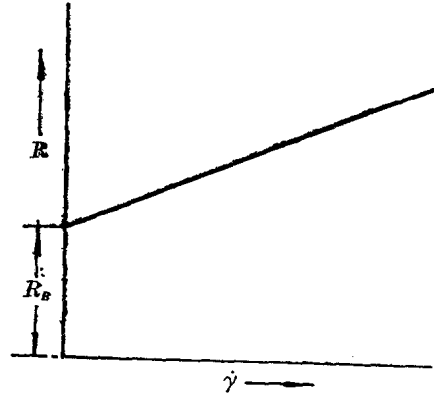


图 (1.4-3) 宾哈姆塑性流体的剪应力 R 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的关系图

假塑性流体、胀塑性流体和宾哈姆塑性流体为与时间无关的非牛顿型流体中的几个例子，也就是说，它们的表观粘度在任何特定的时刻仅与剪切速率有关，而与施加剪切速率的时间无关。

另一类流体，当施加特定剪切速率时，其表观粘度作为时间的函数，随时间不断变化，这些流体即称为与时间有关的非牛顿型流体。在恒定的剪切速率下随时间变成强假塑性的流体，称为触变性流体 (Thixotropic fluids)。在恒定剪切速率下触变性流体的结构会逐渐随时间而破坏，但触变过程为一可逆过程。最后，当结构破坏速率与同时进行的再形成速率相平衡时，即达到动平衡状态，此时在任一恒定速率下表观粘度达到最小值。许多流体，除了具有假塑性或胀塑性流体的行为外，还具有触变性行为。

大部分触变性流体，如将其放置足够长的时间，还能恢复其原有的粘度，有的流体会很快恢复，有的流体可能要经过数小时后才能恢复。

触变性流体剪应力 R 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的标绘关系，如图 (1.4-4) 所示。由图可见，每隔一定时间改变剪切速率时将显示出滞后效应的影响，亦即增加剪切速率所得的曲线与减少速率所得曲线不相吻合。

在恒定剪切速率下，随时间的增长能够变为具有更大胀塑性的流体，被称为流凝性流体 (Rheopectic fluids)。小的剪切运动就能使流凝性的结构形成，超过临界点，结构又被破坏。如果剪切速率较大，结构又不能形成。一般，在恒定剪切速率下，流凝性流体的表观粘度能够随时间的增长增大到最大值；如令其停滞不动，绝大部分流凝性流体能够非常迅速地恢复其原有的粘度。

实际上，真正随时间而变的非牛顿型流体是很少的。

另一类重要的非牛顿型流体是粘弹性流体 (Viscoelastic fluids)，这类流体既具有粘性又具有弹性。在完全弹性固体内，与一定应变相对应的应力与时间无关。与此相反，在粘弹性物料中，应力将随时间逐渐消失。在此情况下，粘弹性物料通过微孔被挤出时，其流股的截面积有可能远大于挤料孔的截面积。这是由于物料部分弹性恢复所致。

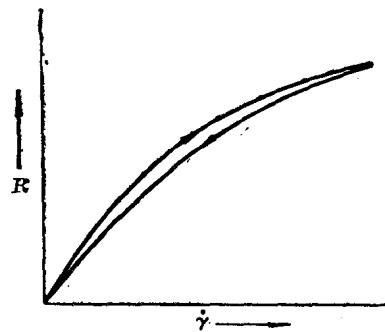


图 (1.4-4) 呈现滞后效应的触变性流体剪应力 R 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的关系图

对于牛顿型流体, 剪切速率 $\dot{\gamma}$ 为剪应力 R 的线性函数, 可由式(1.3-5)给出:

$$\dot{\gamma} = \frac{R}{\mu} \quad (1.3-5)$$

对于非牛顿型流体, $\dot{\gamma}$ 和 R 之间的关系较为复杂, 与时间无关的流体可写为:

$$\dot{\gamma} = f(R) \quad (1.4-2)$$

如将 z 方向上的任一点在水平 x 方向上的速度以 v_x 表达时, 则式(1.4-2)又可改写成:

$$-\frac{dv_x}{dz} = f(R_{,z}) \quad (1.4-3)$$

或针对径向 r 上的任一点改写成下述形式:

$$-\frac{dv_x}{dr} = f(R_{,r}) \quad (1.4-4)$$

式(1.4-2)、(1.4-3)和(1.4-4)为与时间无关流体的通用方程, 在这些式子中, 剪应力与剪切速率的函数关系尚未确定。

许多学者曾经企图利用建立数学模型的方法来确定上述函数关系, 以表达非牛顿型流体的流变行为, 其中, 最简单和应用最为普遍的关系式为指数定律方程[3]:

$$R = K(\dot{\gamma})^n \quad (1.4-5)$$

式中, K 为粘稠系数, n 为指数定律中的指数。凡服从上述方程的流体称为指数定律流体。

对于假塑性流体, $n < 1$; 对于胀塑性流体, $n > 1$ 。对于牛顿型流体, $n = 1$, 同时 K 变为动力粘度系数 μ 。

许多人以指数定律方程缺乏理论基础及其对于不稳态系统不适用为由, 批评它的应用价值, 然而, 在经验上这一定律对于许多流体的数据确实能够给出相当吻合的结果, 这一点对于工程目的已经足够了。

如将 z 方向上任一点在水平 x 方向上的速度以 v_x 表达时, 则式(1.4-5)可改写为:

$$R_{,z} = -K \left(-\frac{dv_x}{dz} \right)^{n-1} \frac{dv_x}{dz} \quad (1.4-6)$$

或针对径向 r 上任一点改写成下述形式:

$$R_{,r} = -K \left(\frac{dv_x}{dr} \right)^{n-1} \frac{dv_x}{dr} \quad (1.4-7)$$

另一些与时间无关的非牛顿型流体的其它数学模型还有艾林(Eyring)、埃利斯(Ellis)和赖纳-菲利波夫(Reiner-Philippoff)模型[1]。

艾林模型为两参数模型, 可用下式表示:

$$R_{,z} = A \operatorname{arcsinh} \left(-\frac{1}{B} \frac{dv_x}{dz} \right) \quad (1.4-8)$$

埃利斯模型为三参数模型, 可用下式表示:

$$-\frac{dv_x}{dz} = [A + B(R_{,z})^{n-1}] R_{,z} \quad (1.4-9)$$

赖纳-菲利波夫模型[4]亦为三参数模型, 可表示成下边的形式:

$$-\frac{dv_x}{dz} = \frac{R_{,z}}{A + \frac{(B-A)}{1 + (R_{,z}/C)^2}} \quad (1.4-10)$$

所有这些流变数学模型均与实验曲线方程相吻合。在应用中, 当超过使用数据范围时,