


化工原理实验及仿真

陈寅生 主编

 東華大學出版社

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验及仿真 / 陈寅生主编. —上海: 东华
大学出版社, 2005. 3

ISBN 7-81038-912-2

I. 化... II. 陈... III. 化工原理—实验—计算
机仿真 IV. TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 011433 号

书 名 / 化工原理实验及仿真
主 编 / 陈寅生
责任编辑 / 张益储
封面设计 / 吴丹红

出 版 / 东华大学出版社
地 址 / 上海市延安西路 1882 号
邮政编码 / 200051
电 话 / 021-62193056
发 行 / 新华书店上海发行所

印 刷 / 昆山亭林印刷有限责任公司
版 次 / 2005 年 3 月第 1 版
印 次 / 2005 年 3 月第 1 次印刷
开 本 / 787×960 1/16
印 张 / 11.25
字 数 / 227 千字
印 数 / 0001~3000
书 号 / ISBN 7-81038-912-2 / TQ·04
定 价 / 20.00 元

内 容 提 要

化工原理是实践性很强的技术基础课,也是化工类各专业一门主干课程,属于工程学科范围,它应用自然科学的基本原理来分析和处理化工生产中的物理过程。而化工原理实验同理论课教学一样是整个化工原理教学中的一个重要环节,两者相辅相成,在培养化工类及其相关专业人才中起着举足轻重的作用。

全书分为实验研究方法、化工原理实验和实验数据处理方法,以及实验室常用测量仪表和附录。本书的特点是将化工原理实验与计算机仿真、模拟及处理结合起来,针对化工原理实验和实验装置,筛选了8个实验研制开发了计算机多媒体仿真、数据模拟采集及处理,增加了实验相关素材的演示,并备有相应的多媒体软件“化工原理实验 CAI”。

本书可作为高等院校化工原理实验教材,也可供化工、生物化工、环境、食品、冶金、制药等相关专业师生和有关部门的专业技术人员作参考用书。

前 言

本书作为化工原理实验教材,注重理论与实践的结合、实验能力和素质的培养与训练,着重介绍了实验研究方法、实验数据处理和实验常用测量仪表的基础知识,实验包括:流体流动、传热、传质等实验,在附录中列出一些测试仪器的使用方法、化工基础数据以便读者查阅,帮助其掌握相关知识,并列出了实验数据记录及整理表格以供参考。

适应现代教育技术发展和学科交叉综合的趋势,本书的特点在于将化工原理实验与计算机仿真技术结合起来,针对化工原理实验装置筛选了8个实验研制开发了计算机多媒体仿真、数据模拟采集及处理软件,另增加了3D动画演示实验相关素材,并有配套“化工原理实验CAI”多媒体软件以达到实验教学辅助目的。

本书由东华大学陈寅生主编,刘建奇、李晓斌、杜与冲参加部分编写;北京化工大学杨祖荣教授、东华大学黄南薰教授审阅并提出宝贵意见。在本书编写过程中得到了有关领导和老师的热情支持和帮助,在此向他们表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促,编者的学识和经验有限,对于书中存在的不妥之处,殷切地希望广大读者指正。

编 者

2005年1月

目 录

绪论	1
一、化工原理实验目的	1
二、化工原理实验计算机仿真、数据模拟采集及处理的特点	1
三、化工原理实验的要求	2
第一章 化工原理实验研究方法	5
一、因次分析法	5
二、数学模型法	7
三、直接实验法	9
四、冷模实验法	9
第二章 化工原理实验	10
实验一 雷诺实验	10
实验二 柏努利方程实验	13
实验三 流体力学综合实验	16
(一) 管道流体阻力测定	16
(二) 孔板流量计及文氏流量计的校验	25
(三) 离心泵特性曲线的测定	30
实验四 离心泵特性曲线的测定	32
实验五 对流传热综合实验	44
实验六 板式塔精馏实验	54
实验七 填料精馏塔实验	65
实验八 板式塔流体力学性能测定	69
实验九 吸收-解吸实验	75
实验十 干燥实验	80
第三章 实验数据的处理方法	89
一、有效数字与运算规律	89
二、实验数据的误差分析	89
三、实验数据处理	92

四、实验数据的方程表示法	98
第四章 实验室常用测量仪表	104
一、压力测量	104
二、流量测量	109
三、温度测量	122
附录	133
附录 1 S XK—2 型高精度流量积算仪	133
附录 2 ZW5433 三相数字电量表	135
附录 3 液体比重天平使用说明	136
附录 3.1 乙醇溶液比重表	138
附录 3.2 水的密度表	142
附录 4 阿贝折射仪	142
附录 4.1 乙醇~丙醇折射率与溶液浓度的关系	144
附录 4.2 正庚烷~甲基环乙烷体系的组成与折射率关系	144
附录 5 溶氧仪	145
附录 5.1 不同温度的氧在水中的浓度	146
附录 6 气液平衡数据	147
附录 6.1 常压下乙醇~水溶液气液平衡数据	147
附录 6.2 常压下乙醇~丙醇气液平衡数据	147
附录 6.3 常压下正庚烷~甲基环乙烷的气液平衡数据	148
附录 7 四种填料的特性参数	148
附录 8 计算机数据自动采集及自动控制原理	148
附录 9 《化工原理实验 CAI》安装操作说明	149
附录 10 《化工原理实验 CAI》操作方法	154
附录 11 化工原理实验数据记录及整理表格	159
附录 11.1 雷诺实验数据记录及整理表格	159
附录 11.2 柏努利方程实验数据记录及整理表格	159
附录 11.3 管道流体阻力测定实验数据记录及整理表格	160
附录 11.4 孔板流量计及文氏流量计校验实验数据记录及整理表格	162
附录 11.5 离心泵特性曲线测定实验数据记录及整理表格	163
附录 11.6 传热综合实验数据记录及整理表格	164
附录 11.7 板式塔精馏实验数据记录及整理表格	165

附录 11.8 填料塔精馏实验数据记录及整理表格	165
附录 11.9 板式塔流体力学性能测定数据记录及整理表格	166
附录 11.10 吸收~解吸实验数据记录及整理表格	166
附录 11.11 干燥实验数据记录及整理表格	168
参考文献	170

绪 论

一、化工原理实验目的

化工原理实验是化工教学中的重要组成部分,是以化工原理为基础而相辅相成的一门工程实验课程。工程实验与基础实验不同,它所面对的是复杂的实际问题和工程问题,处理的对象不同,实验研究的方法也必然不同,化工原理每个实验本身就相当于化工生产应用的一个基本过程。通过化工原理实验不仅使学生加深对化工基本原理的理解,更重要在于对学生进行实验研究方法、实验技能的基本训练,培养学生具备对实验现象有敏锐的观察能力,运用各种实验手段正确地获取实验数据的能力,分析和归纳实验数据和实验现象的能力,由实验数据和实验现象得出结论并提出自己的见解,增强创新意识,综合运用理论知识,提高分析和解决实际问题的能力。

因此通过实验应达到如下目的:

1. 验证化工过程的基本理论,并运用理论分析实验过程,使理论知识得到进一步的理解和巩固。
2. 熟悉实验装置的流程、结构和操作,以及化工中常用仪表的使用方法。
3. 掌握化工数据的基本测试技术,例如包括操作参数(压强、流量、温度等)和设备特性参数(阻力系数、传热系数等)及特性曲线的测定方法。
4. 增强工程概念,掌握实验的研究方法,培养学生进行设计实验,组织实验的能力。
5. 提高数据处理和分析问题的能力,并完整地撰写实验报告。

二、化工原理实验计算机仿真、数据模拟采集及处理的特点

随着现代教育技术的发展,科学交叉和综合的趋势,化工原理实验教学内容、实验过程及数据处理与计算机技术结合,将计算机作为媒体给学生提供了一个环境,人机交互对话进行学习的一种教学方法,它改变了以往传统的教学模式。化工原理实验 CAI,利用计算机图形技术在显示器屏幕上仿真化工原理实验装置,通过计算机输入器(鼠标或键盘)来模拟实验装置的操作过程,再借助化工数学模型和计算机的数值计算来模拟化工实验各参数在操作过程的变化和数据模拟采集及处理,实测实验数据处理及结果图示的计算机仿真实验系统,以达到实验教学辅助目的。课件具有以下特点:

1. 课件激发了学生的兴趣,调动了学生对实验教学学习的积极性。

2. 课件作为实验预习及操练,实验时达到事半功倍的效果。
3. 课件具有提供化工基础数据及数据处理功能,可作为检验学生实验结果的工具。
4. 课件能模拟非正常的操作及实验不易观察到的现象,并不局限于实验,在实验的基础上延伸拓宽,增加了相关素材的演示。
5. 课件界面友好,清晰美观,实现界面控制与多媒体信息传输。

三、化工原理实验的要求

化工原理实验应包括实验预习、实验操作、测定、记录和数据整理、实验报告编写等步骤。为了保证实验的质量,顺利完成实验并做出合格的实验报告,故对实验过程中各个步骤提出如下说明和要求。

1. 实验预习

- (1) 认真阅读实验指导书,明确本次实验的内容和要求;
- (2) 根据本次实验的具体任务,研究实验的理论依据和实验的具体做法,分析应该测取哪些数据,并估计这些数据的变化规律。
- (3) 到实验室现场结合实验指导书仔细了解摸索实验流程、主设备的构造、仪表的安装部位、测量原理和使用方法。根据实验任务和现场勘察,拟定实验方案和操作步骤。
- (4) 结合实验多媒体仿真软件进行计算机模拟实验及相关实验素材的多媒体演示。

2. 实验操作

化工原理实验一般由 3~4 人为一组,因此实验操作时要求实验小组的成员各司其职(包括操作、读取数据、记录数据等),而且在适当的时候轮换岗位做到既分工又相互配合协同完成实验。

- (1) 实验设备启动前必须检查:
 - 1) 设备、管道上各个阀门的开、关状态是否符合流程要求;
 - 2) 泵等转动的设备,启动前先盘车检查能否正常转动,才可启动设备;
 - 3) 掌握仪表的正确使用方法。
- (2) 实验操作时应该全神贯注,认真操作和记录实验数据,并观察实验现象,发现问题及时处理或报告实验指导老师。
- (3) 实验操作结束时应先后将有关气源、水源、热源、测试仪表的连通阀门以及电源关闭,然后切断主设备电源,调整各阀门应处的开或关位置状态。
- (4) 将读取的实验数据输入计算机处理,检验实验是否正确,如果有错即重做实验。

3. 实验测定、记录和数据整理

- (1) 实验测取的数据

凡是影响实验结果或是整理数据时必需的参数都应测取。它包括大气条件、设备有关尺寸、物理性质及操作数据等。凡可以根据某一数据导出或从手册中查得就不必直接测定。例如水的密度、粘度、比热等物理性质，一般只要测出水温后即可查出，因此不必直接测定这些性质只测定水的温度就可以了。

(2) 实验数据的读取及记录

1) 根据实验目的要求，在实验前做好数据记录表格，在表格中应记下各项物理量的名称、表示符号及单位。

2) 实验时待现象稳定后才开始读取数据，条件改变后，也要稳定一定时间后读取数据，以排除因仪表滞后现象而导致读数不准的情况。

3) 每个数据记录后，应该立即复核，以免发生读错或写错数据。

4) 数据记录必须反映仪表的精度。一般要记录到仪表最小分度以下一位数。

5) 实验中如果出现不正常情况，以及数据有明显误差时，应在备注栏中加以注明。

(3) 实验数据的整理

1) 原始记录数据只可进行整理，绝不可修改。经判断确系过失误差所造成的不正确数据可以注明后不计入结果。

2) 同一实验点的几个有波动的数据可先取其平均值，然后进行整理。

3) 采用列表法整理数据清晰明了，便于比较。在表格之后应附计算示例，以说明各项之间的关系。

4) 运算中尽可能利用常数归纳法(即转化因子)，详见实验数据的处理方法中列表法。

5) 实验结果用列表、绘制曲线、图形或方程式的形式表达。

4. 实验报告的编写

实验报告的编写必须简单扼要，数据完整，交代清楚，结论正确，有讨论，有分析，得出公式或曲线，图形有明确的实验条件，报告的格式一般应包括下面各项内容：

(1) 实验名称；

(2) 报告的作者及同实验小组人员的姓名(同组人的姓名一般写在报告首页的右上角)；

(3) 实验目的；

(4) 实验原理；

(5) 实验装置流程及说明(应包括流程示意图和主要设备、仪表的类型及规格)；

(6) 实验数据：

1) 实验数据记录；

2) 实验数据整理。

以上实验数据记录及数据整理均列表表示。

(7) 计算示例。其中引用的数据要说明来源,简化公式要写出导出过程,要列出某一组数据的计算过程作为计算示例。

(8) 实验结果及讨论。根据实验任务,明确提出本次实验的结论,用图示法、经验公式或列表法均可,但都必须注明实验条件。并对实验结果做出评价,分析误差大小及原因,对实验中发现的问题等作必要的讨论,对实验方法、实验设备有何建议也可写入此栏。

第一章 化工原理实验研究方法

在长期的经验总结和实验研究的基础上,化工原理实验逐步形成的研究方法主要有因次分析法、数学模型法、直接实验法和冷模实验法。

一、因次分析法

化工过程中不能用解析方法导出处理论公式的问题,需要借助于实验研究方法建立经验关系式,例如流体力学和传热中,涉及到设备的几何条件、流体流动情况、流体的物性变化等多因素的影响。研究多变量影响过程的规律,往往采用固定其他变量,依次改变其中某一个变量的网络法进行实验,如果变量数为 m 个,每个变量改变条件数为 n 次,那么所需实验的次数为 n^m 次,若按照这种方法开展实验,实验工作量必然很大难以实现。为了减少实验的工作量并使得到的实验结果具有一定的普遍性,因次分析法是解决这类问题的实验研究方法。

因次分析法的基础是因次一致性原则。白金汉(Buchiughan)提出著名的 π 定理指出:任何物理方程必可转化为无因次形式,即可用无因次数群关系式代替原来的物理方程,无因次数群的个数等于原方程的变量数减去基本因次数。根据 π 定理,可将多变量函数整理为无因次数群函数,然后通过实验归纳成准数关系式,从而减少实验工作量又可将实验结果应用于工程设计计算中。

例如流体在管内流动的阻力和摩擦系数关联式是利用因次分析法和实验而得出的。由实验可知:流体在管内作湍流流动时影响流体阻力的因素是流体流过的管径的 d 、管长 L 、平均流速 u 、流体的物性、密度 ρ 和粘度 μ 及管壁粗糙度 ϵ 。写成函数关系式为:

$$\Delta p = f(d, L, u, \rho, \mu, \epsilon) \quad (1-1)$$

上式可用幂函数方程形式表示:

$$\Delta p = Kd^a L^b u^c \rho^e \mu^f \epsilon^g \quad (1-2)$$

式中的常数 K 和指数 a, b, c, e, f, g 均为待定值。

通过因次分析,将变量无因次化,式中各物理量的因次以基本因次质量 $[M]$ 、长度 $[L]$ 、时间 $[\theta]$ 表示。

$$\begin{aligned} [p] &= ML^{-1}\theta^{-2} & [\rho] &= ML^{-3} \\ [d] &= L & [\mu] &= ML^{-1}\theta^{-1} \end{aligned}$$

$$[u] = L\theta^{-1} \quad [\epsilon] = L$$

把各物理量的因次代入式(1-2)得:

$$ML^{-1}\theta^{-2} = K[L]^a[L]^b[L\theta^{-1}]^c[ML^{-3}]^e[ML^{-1}\theta^{-1}]^f[L]^g \quad (1-3)$$

$$\text{即:} \quad ML^{-1}\theta^{-2} = K[M]^{c+f}[L]^{a+b+c-3e-f+g}[\theta]^{-c-f} \quad (1-4)$$

根据物理方程因次一致性原则,等式两边各基本量的因次指数必然对应相等,可得方程组:

$$\begin{aligned} \text{对因次}[M] & \quad e+f=1 \\ \text{对因次}[L] & \quad a+b+c-3e-f+g=-1 \\ \text{对因次}[\theta] & \quad -c-f=-2 \end{aligned}$$

这样得到三个基本方程,有6个未知数,可把其中三个未知数 b、f、g 表示 a、c、e,解此方程组,可得:

$$\begin{cases} a = -b - f - g \\ c = 2 - f \\ e = 1 - f \end{cases}$$

将求得的 a、c、e 代入方程式(1-2),即得:

$$\Delta p = Kd^{-b-f-g}L^b u^{2-f} \rho^{1-f} \mu^f \epsilon^g \quad (1-5)$$

将指数相同的各物理量合并在一起,得:

$$\frac{\Delta p}{\rho u^2} = K \left(\frac{L}{d}\right)^b \left(\frac{du\rho}{\mu}\right)^{-f} \left(\frac{\epsilon}{d}\right)^g \quad (1-6)$$

上式只包括四个无因次数群, L/d : 反映管子的长径比,即与管子的几何尺寸有关, $\frac{du\rho}{\mu}$ 即为雷诺准数 Re, 反映流体流动特性, ϵ/d 为绝对粗糙度与管径之比称为相对粗糙度,与管子的材质有关, $\frac{\Delta p}{\rho u^2}$ 表示压力与惯性力之比,称为欧拉[Euler]准数,通常以 Eu 表示。

由 π 定理可得出影响过程的物理量总数为7个,基本因次为3,因此可得上述4个无因次准数。

另将式(1-6)整理可得:

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho} = 2K \left(\frac{L}{d}\right)^b \left(\frac{du\rho}{\mu}\right)^{-f} \left(\frac{\epsilon}{d}\right)^g \frac{u^2}{2} \quad (1-7)$$

范宁(Fanning)公式:

$$h_f = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{u^2}{2} \quad (1-8)$$

将上面两式相比较,可得:

$$\lambda = 2K \left(\frac{du\rho}{\mu} \right)^{-1} \left(\frac{\epsilon}{d} \right)^g \quad (1-9)$$

或:
$$\lambda = \varphi(\text{Re}, \epsilon/d)$$

由以上分析可以看出,通过因次分析可将一个复杂的多变量影响的管内流体阻力计算问题,简化为摩擦系数 λ 研究和确定,具体的函数关系须由实验确定。另外应用因次分析时,必须对所研究的过程作深入的了解,确定有关的物理量,如果遗漏一个主要的物理量,或把无关的物理量列入内,那么就会得出不正确的结果,甚至导致错误的结论。因此应用因次分析法必须仔细谨慎。

二、数学模型法

数学模型法是建立在对过程的内在规律作深入的研究和充分的认识基础上,对复杂的问题高度概括得出简化而又近似实际过程的物理模型并用数学方程表示的数学模型。下面介绍根据吸收速率方程求填料层高度的传质速率数学模型。

填料塔内气液两相是连续接触的,气、液组成 Y 、 X 沿填料层高度连续地变化,因而各截面上的传质推动力 ΔY (或 ΔX)和传质速率均随之变化,对整个填料吸收塔而言,不同截面上的传质速率各不相同,因此,必须从填料层内某一微元填料层 dZ 内溶质的吸收过程进行分析。

如图1-1所示, dZ 微元填料层中的传质面积, dA 为:

$$dA = \Omega dZ a \quad (1-10)$$

式中: dA —— dZ 微元填料层内的传质面积(m^2);

Ω ——塔的截面积(m^2);

a ——单位体积填料层所提供的有效接触面积(称为有效比表面积)(m^2/m^3)。

根据物料衡算:

气相经 dZ 后,其中被吸收的溶质量为:

$$dG = V dY \quad (1-11)$$

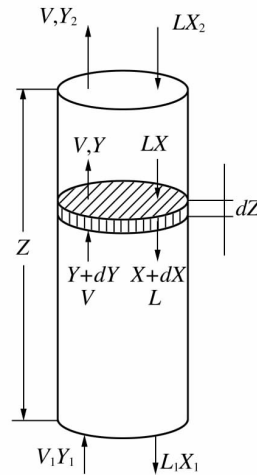


图 1-1 微元填料层的物料衡算

液相经 dZ 后,其中吸收的溶质量为:

$$dG = LdX \quad (1-12)$$

根据吸收速率方程,微元填料层内溶质的吸收量为:

$$dG = K_Y(Y - Y^*)dA \quad (1-13)$$

或

$$dG = K_X(X^* - X)dA \quad (1-14)$$

式中: K_Y ——以 $(Y - Y^*)$ 为总推动力的气相总吸收系数 ($\text{kmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$);

K_X ——以 $(X^* - X)$ 为总推动力的液相总吸收系数 ($\text{kmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$);

Y^* ——与液相组成 X 成平衡的气相组成;

X^* ——与气相组成 Y 成平衡的液相组成。

式(1-10)、(1-11)、(1-13)联立得:

$$dZ = \frac{V}{K_{Ya}\Omega} \frac{dY}{Y - Y^*} \quad (1-15)$$

同理: 由式(1-10)、(1-12)、(1-14)联立得:

$$dZ = \frac{L}{K_{Xa}\Omega} \frac{dX}{X^* - X} \quad (1-16)$$

由于单位体积填料层内的有效传质面积 a 小于单位体积填料层中的固体表面积(称比表面积)。 a 值不仅与填料的形式、尺寸及充填状况有关,而且还受流体物性及流动状况的影响。要直接测出 a 值是困难的,因此常把 K_Y 与 a (或 K_X 与 a) 的乘积视为一体,称为体积传质系数。实验研究时把 K_{Ya} (或 K_{Xa}) 一并测定,其单位为 $\text{kmol}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$,其物理意义是在单位推动力,单位时间,单位体积填料层内吸收的溶质量。

根据分离要求,式(1-15)积分可得所需填料层高度 Z :

$$Z = \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{V}{K_{Ya}\Omega} \frac{dY}{Y - Y^*} \quad (1-17)$$

上式中, Ω 、 V 为常数。当 Y 较小时,可以认为包含溶质在内的气体流量及液流量在全塔中基本不变,气、液相物性变化也较小,因此各截面上体积传质系数 K_{Ya} 变化不大,可视为与塔高无关的常数,故:

$$Z = \frac{V}{K_{Ya}\Omega} \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y^*} \quad (1-18)$$

同理可得:

$$Z = \frac{L}{K_{Xa}\Omega} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{X^* - X} \quad (1-19)$$

由式(1-8)得:

$$K_Y a = \frac{V}{Z\Omega} \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y^*} \quad (1-20)$$

上式即为吸收实验测定气相总体积的吸收系数的数学模型。

三、直接实验法

直接实验法即对被研究的对象进行直接的实验以获取其相关的参数及规律。用直接实验测定特定的工程问题所得的结果较为可靠,对于其他实验研究方法无法解决的工程问题是一种直接有效的方法。但这种方法也有很大的局限性,得出的只是个别参数之间关系的规律,不能反映对象的全部本质,这些实验结果只能用到特定的实验条件和实验设备上,或推广到实验条件完全相同的现象。另外实验工作量大,耗时费力,有时需要较高的投资。

四、冷模实验法

冷模实验主要用于流动状态、传递过程等物理过程模拟研究,通过模拟实验结果去分析、推测实际过程。例如利用空气和水并加入示踪剂可进行气液传质的实验研究,为气液传质设备的设计和改造提供参数;利用空气和砂进行流态化的实验研究,为流化床反应器设计提供依据。因此利用空气、水和砂等模拟物料替代真实物料在工业装置结构尺寸相似实验装置中研究各种工程因素对过程影响规律的实验称为“冷模实验”。冷模实验法的优点概括如下:

1. 冷模实验结果可推广应用于其它实际流体,将小尺寸实验设备的实验结果推广应用于大型工业装置,使得实验能够在物料种类上“由此及彼”在设备尺寸上“由小见大”。
2. 直观、经济、用少量实验,结合数学模型法或因次分析法,可求得各物理量之间的关系,使实验工作量大为减少。
3. 可进行在真实条件下不便或不可能进行的类比实验,减少实验的危险性。

值得指出的是,冷模实验结果必须结合化学反应等特点。进行校正后才可用于工业过程的设计和开发。

第二章 化工原理实验

实验一 雷诺实验

一、实验目的

1. 建立“滞流和湍流两种流动形态”的感性认识。
2. 观察雷诺准数与流体流动类型的相互关系。
3. 观察滞流时流体在圆管内的速度分布曲线。

二、实验原理

1. 滞流时,流体质点做直线运动,即流体分层流动与周围的流体无宏观的混合,湍流时,流体质点呈紊乱地向各方向作随机的脉动,流体总体上仍沿管道方向流动。

2. 雷诺准数是判断实际流动类型的准数。若流体在圆管内流动,则雷诺准数可用下式表示:

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} \quad (2-1)$$

一般认为,当 $Re \leq 2000$ 时,流体流动类型属于滞流;当 $Re \geq 4000$ 时,流动类型属于湍流;而 Re 值在 $2000 \sim 4000$ 范围内是不稳定的过渡状态,可能是层流也可能是湍流,取决于外界干扰条件。如管道直径或方向的改变、管壁粗糙,或有外来振动等都易导致湍流。

3. 对于一定温度的流体,在特定的圆管内流动,雷诺准数仅与流速有关。本实验是改变水在管内的速度,观察在不同雷诺准数下流体流型的变化。

理论分析和实验证明,滞流时的速度沿管径按抛物线的规律分布。中心的流速最大,愈近管壁流速愈慢。湍流时由于流体质点强烈分离与混合,所以速度分布曲线不再是严格的抛物线,湍流程度愈剧烈,速度分布曲线顶部的区域愈广阔而平坦,但即使湍流时,靠近管壁区域的流体仍作滞流流动,这一层称为滞流内层或滞流底层。它虽然极薄,但在流体中进行热量和质量的传递时,产生的阻力比流体的湍流主体部分要大得多。