

主编 吕维忠

化学工程 基础实验技术 Chemistry

*Chemistry
Experimentation
Technology*

中国人民公安大学出版社

化学工程基础实验技术

主 编 吕维忠
编 者 廖传东 韦少慧
郑宗坤

中国人民公安大学出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

化学工程基础实验技术/吕维忠主编. —北京: 中国人民公安大学出版社, 2003. 9

ISBN 7-81087-466-7

I. 化… II. 吕… III. 化学工程—化学实验
IV. TQ016

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 081538 号

化学工程基础实验技术

HUAXUE GONGCHENG JICHU SHIYAN JISHU

吕维忠 主编

出版发行: 中国人民公安大学出版社

地 址: 北京市西城区木樨地南里

邮政编码: 100038

经 销: 新华书店

印 刷: 北京蓝空印刷厂

版 次: 2003 年 9 月第 1 版

印 次: 2003 年 9 月第 1 次

印 张: 4.25

开 本: 850×1160 1/32

字 数: 106 千字

印 数: 0001~1000 册

ISBN 7-81087-466-7/G·094

定 价: 17.00 元

本社图书出现印装质量问题, 由发行部负责调换

联系电话: (010)83903254

版权所有 翻印必究

E-mail: cpep@public.bta.net.cn

目 录

第一章 绪 论	(1)
一、化学工程基础实验课程的目的和任务	(1)
二、化学工程基础实验与工程试验方法	(3)
三、化学工程基础实验课程的内容及教学要求	(11)
第二章 实验内容(一)	(14)
一、流体流动型态的观察与测定	(14)
二、管道流动阻力的测定	(18)
三、流量计的标定	(28)
四、柏努利方程实验	(33)
五、离心泵性能的测定	(39)
六、传热实验	(51)
七、沸腾干燥实验	(61)
第三章 实验内容(二)	(66)
八、板式塔精馏实验	(66)
九、板式塔的液体力学实验	(71)
十、吸收实验	(76)
十一、过滤实验	(90)
十二、超滤实验	(96)
十三、电除尘演示实验	(99)
十四、旋风分离演示实验	(103)

十五、干燥实验	(106)
附 录	(111)
一、单位换算	(111)
二、物理特性	(118)
三、管道及阀门参数	(125)
参考文献	(131)

第一章

绪 论

一、化学工程基础实验课程的目的和任务

化学工程基础也称为化学工程,是研究化工单元操作的基本原理、典型设备的结构原理、操作性能和设计计算的学科,是化学、化工、环境、轻工等专业的重要技术基础课。由于化学工程基础的自身特点,在其发展过程中,形成了以实验方法和教学模型为主的研究方法。实验方法系直接通过各种实验或在因次分析方法指导下实验,直接测定将各变量之间的关系,以图表或经验公式的形式表示出来。数学模型方法是,首先对复杂的实际问题在深刻理解了其内部规律的基础上,提出一个比较接近实际问题的物理模型,建立描述这个物理模型的数学方程,然后确定方程的初始条件,并求解方程。虽然由于计算机技术的发展,人们求解数学方程的能力得到很大提高,但由于化工过程的复杂性,建立物理模型及数学方程的难度仍然很大,使其应用受到了限制。另外,数学模型法也是离不开实验的,只有通过实验,了解了其内部规律,才能提出不失真的模型,最后还要依靠实验,检验其模型的等效性并确定模型参数。所以,化学工程基础是建立在实验基础上的学科,化学工程基础的发展离不开实验技术的发展。

化学工程基础课程向同学们展示了一系列化工生产过程中特有的现象、规律以及化工设备。长期以来,化学工程基础实验常以验证课堂理论为主,在教学安排上,常常作为化学工程基础课程的一部分。但近些年来,随着石油化工、生物化工、环境化工等学科的高速发展,对化工过程与设备的研究提出了更高的要求,研究新型高效率、低能耗的化工设备也更为迫切。为了适应这种形势的需要,国内外高等化工教育界,纷纷出现了大量加强实验教学的趋势,许多高校已单独设立化学工程基础实验课,以培养有创造性的新型科技人材。

(一)巩固和加深对化工单元操作的理解,培养和提 高在实践中运用理论知识分析问题、解决问题的能力

化学工程基础课程中所讲授的内容,对多数学生来说是比较生疏的,他们对此内容的理解也往往比较肤浅,对各种过程的影响因素还不够深刻。通过化学工程基础实验,可使学生直接观察到某些生动的现象,如雷诺实验中,可观察到流体流动的层流和湍流型态;通过实验可直接验证某些重要的理论和规律,如柏努利方程实验中可使学生直接验证能量守恒及各种能量之间的相互转化;通过实验可直接测取某些设备的性能,例如,离心泵实验中,可直接测得代表离心泵性能的特性曲线,并对泵的使用方法及特性曲线的实际应用产生深刻的认识。如果没有这些实验,虽然学生们也可以学习化学工程基础,但那只能迫使他们单纯地接受书本上的陈述及老师们的讲解,并只能以此来作为判断正误的标准,这样就会使学生们失去大胆探索创新的要求和能力,只能盲目地接受前人的知识而难以有所创新和突破。正是通过实验,使学生们更贴近实际问题,从而提高分析和解决实际问题的能力。

(二)培养学生从事工程实验研究的能力及严谨认真的科学态度

化学化工类的毕业生都必须具备一定的实验研究能力,在基

基础化学的实验课中,学生们已受到了基础实验能力的训练,而化学原理实验及随后的专业课则明显不同于基础课的实验。它使学生第一次接触到工程装置,一般是几人一组共同完成,且实验的灵活性及要求学生的主动性更大,同时,它也比较接近实际生产过程,所以培养学生从事化工实验的能力具有承前启后的作用。化工实验能力的培养主要包括:为了完成一项研究课题或解决实际问题、设计实际方案的能力,适当选择和正确使用设备及测量仪表的能力;进行实验、观察和分析实验的能力,正确处理实验数据及运用文字表达实验报告的能力。这些能力的获得,只有通过一定数量的基础实验练习,经过反复训练才能达到,从而为将来参加实际工作后能独立从事科研和开发打下一定的基础。

有些实验,从准备实验、进行实验到整理数据写成实验报告,往往要花费很长的时间,可能有的学生认为从这些实验所收获的与其花费的时间不成比例,从而可能会产生草率从事、敷衍过去的做法,这种态度是很有害的,轻则实验数据不好而得不出什么结论,重则会造成设备损坏或人身事故,所以正是通过这些严密的步骤,使学生认识到一个科学实验的基本过程与基本要求,养成一种踏踏实实、一丝不苟的严肃态度。另外,由于化工过程和设备的复杂性,测定的实验数据可能和理论数据有较大的差距,某些学生为了追求好的实验结果和成绩,可能会修改或编造实验数据,这种做法更是极其有害的,这样会使数据失去可靠性,失去了解决实际问题和发现新问题的机会,更为可怕的是这种态度会对以后学生本人的成长及社会造成难以估量的损害,所以,培养学生养成实事求是的科学态度,显得更为重要。

二、化学工程基础实验与工程试验方法

化学工程基础实验是同学们在学习过一些基础课实验后遇到的第一门属于工程范畴的课程。工程实验与基础实验有着明显的

不同,后者所处理的对象通常比较简单,偏离理想体系不远,所采用的研究方法大都以严密的理论体系为基础,但前者所涉及的物料千变万化,设备大小悬殊,实验量和工作量也都很大,其研究方法不能套用一般基础实验的方法,而采用专门用于研究工程问题的因次分析方法和数学模型方法指导下的实验研究方法。采用这两种研究方法,可以使实验研究结果由小到大、由此及彼地用到大型设备生产及设计上。下面先考察一下流体流动阻力的研究方法。

圆管内流体流动阻力是管路设计中必须解决的典型工程实际问题。当圆管内流动属层流流动时,因为流体符合牛顿粘性定律,通过数学分析导出了用于计算直管中层流流动时阻力损失的泊渭叶方程。在实际化工生产中能通过数学分析直接解决问题的情况很少。当管内流动属于湍流时,情况就复杂得多,由于湍流时,其剪应力已不符合简单的牛顿粘性定律,解决该问题就只好采用实验方法了。

通过考察湍流流动过程可知,影响流体流动阻力 h_f 的因素主要包括流体的密度 ρ 、粘度 μ 、流速 u 、管径 d 、管长 l 、管的粗糙度 ϵ 等因素。若按常规的网络法安排实验,每个因素取 10 个水平,则需 10^5 次实验,其工作量之大是难以完成的。然而更为重要的是,为改变 ρ 、 μ 要用多种流体,而改变 d 、 ϵ 要更换不同的实验装置,若为了改变 ρ 而固定 μ 则几乎是难以实现的。由此可见,进行实验测定还需要有正确的实验方法指导才行,而因次分析法和数学模型法可以成功地指导实验,使研究实验结果由小见大、由此及彼地推广使用。下面分别进行阐述。

(一)因次分析法

因次也称为量纲,是指物理量的种类,它不同于单位,单位则是比较同一物理量大小所采用的标准。同一因次可以有不同的单位,如长度的因次为 $[L]$,可以有米、厘米、毫米等单位。因次分析法的理论基础是因次一致性原理和 π 定理。

因次一致性原理:任何根据基本定律导出的物理方程式,其中各项的因次都是相同的。

π 定理:任何因次一致的物理方程,都可以表示为一组无因次数群的零函数,且无因次数群的个数 i 等于方程原方程变量数 n 减去其基本因次数 a 。

下面以研究湍流流动阻力为例,阐述因次分析法的应用步骤。

1. 通过初步的实验及理论推断确定被研究过程的主要影响因素,这也是因次分析法的关键步骤。

湍流流动阻力的影响因素有: $h_f = \psi(d, u, \rho, \mu, l, \epsilon)$

或写成: $f(h_f, d, u, \rho, \mu, l, \epsilon) = 0$

2. 选择这几个变量所涉及的基本因次,用基本因次表示所有变量的基本因次,此处选择基本因次 $[L]$ 、 $[M]$ 、 $[T]$ 。

3. 在 n 个变量中,选择 m 个相互独立的基本变量,这 m 个变量的因次,应包括 n 个变量中所有的基本因次,此处选择 d, u, ρ , 则 $m=3$ 。

4. 根据因次一致性原理和 π 定理,进行因次分析,确定各无因次数群的表达式。

此处,经过因次分析(参见化学工程基础教材),得到各无因次数群:

$$\pi_1 = \frac{h_f}{u^2}$$

$$\pi_2 = \frac{du\rho}{\mu}$$

$$\pi_3 = \frac{\epsilon}{d}$$

$$\pi_4 = \frac{l}{d}$$

其无因次数群的个数 $i = n - m = 7 - 3 = 4$

5. 将所研究过程用 i 个无因系数群表示, 为了便于实验求取系数, 常将其写成幂函数的形式, 以方便取对数后求取系数和指数。

$$\frac{h_r}{u^2} = \psi\left(\frac{du\rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d}, \frac{l}{d}\right) = K\psi'\left(\frac{du\rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d}\right)\left(\frac{l}{d}\right)$$

6. 通过实验求得函数表达式的具体形式。

通过实验发现 $m=1/2, p=1$, 则上式变为:

$$h_r = K\psi'\left(\frac{du\rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d}\right)\left(\frac{l}{d}\right) \frac{u^2}{2}$$

$$h_r = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2}$$

$$\text{其中 } \lambda = \psi'\left(\frac{du\rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d}\right)$$

由于 λ 与 $\frac{du\rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d}$ 经验式比较复杂, 常将它们的关系绘成线图使用。

从阻力损失的表达式可看出, 只变更 Re 和 $\frac{\varepsilon}{d}$ 就可掌握阻力损失的变化规律。实验时, 可以采用水为介质, 改变流速 u 就可改变 Re 数, 再更换几种不同的管子, 就可改变 $\frac{\varepsilon}{d}$, 从而求得 λ 与 Re 数和 $\frac{\varepsilon}{d}$ 的关系。显然, 这种方法所需的实验次数和对设备的要求都是容易做到的, 并且其结果能够推广使用。实验表明, 对光滑管及无严重腐蚀的工业管道采用上述方法计算阻力损失的误差, 都在 10% 之内, 这就说明用因次分析法解决流动阻力的问题, 是符合要求的。

(二) 数学模型法

数学模型法是解决工程问题的另一种实验规划方法, 它与因次分析法不同, 后者不要求对所研究过程的内在规律有深刻的认

识,所以此种方法也称为黑箱模型法,但数学模型法是在对所研究过程有深刻认识的基础上,要求对过程作出高度的概括,得到简单而不失真的物理模型,然后给予数学上的描述,再通过实验检验模型的有效性,并确定模型参数。下面以过滤操作中,流体通过颗粒床层的流动为例,说明数学模型法的应用步骤。

流体通过颗粒床层的流动与普通管内流动相仿,都属于固体边界层内部的流动问题,就流动过程本身而言,并没有什么特殊性,但问题在于颗粒床层中颗粒大小不均匀,表面粗糙,使流体通道呈现出规则的几何形状,且为不均匀的纵横交错的网状通道,从而不能直接套用处理直管流体力学的方法,而此处采用数学模型法。

1. 简化物理模型的建立。

在固定床层内,大量细小而密集的颗粒对流体的运动提供了很大的阻力。这一阻力,一方面可使流体沿床层截面的速度分布均匀;另一方面也引起了很大的压强降。而工程上主要对影响过滤操作速度的后者感兴趣。流体通过床层的流动非常缓慢,呈爬流状态。流动阻力主要来自颗粒的表面摩擦,因而其流动阻力主要与颗粒的总面积成正比,而与通道的形状关系不大,这样在保证单位体积内表面相等的前提下,就可把图 1-1 所示的复杂的均匀网状

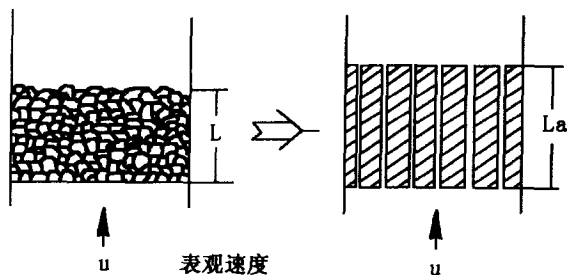


图 1-1 颗粒床层的简化模型

通道,简化为一组平行排列的均匀细管,使之可用数学方程加以描述,这种经过简化而得到的等效流动过程就称为真实流动过程的物理模型。

根据简化前提,该模型应满足下列条件:

根据简化前提,该模型应满足下列条件:①细管的内表面积等于床层颗粒的全部表面积;②细管的全部流动空间等于颗粒床层的空隙容积。

由上述假定可求得这些虚拟细管的当量直径 d :

$$d_m = \frac{4 \times \text{通道的截面积}}{\text{润湿周边}}$$

分子与分母同乘 L_m , 则得

$$d_m = \frac{4 \times \text{床层的流动空间}}{\text{细管的全部内表面}}$$

以 1m^3 床层体积为基准,则床层的流动空间为 ϵ ,其颗粒表面也即床层的比表面 α_m ,

$$\text{则} \quad d_m = \frac{4 \times \epsilon}{\alpha_m} = \frac{4 \times \epsilon}{\alpha(1-\epsilon)} \quad (1-1)$$

按照此简化模型,流体通过固定床层的压降相当于流体通过一组当量直径为 d_m ,长度为 L_e 细管的压降。

2. 数学模型。

通过上述的物理模型简化,已将流体通过具有复杂几何边界的床层流动问题转化为了通过均匀圆管的流动问题,从而可按计算直管压降的方法进行数学描述:

$$h_r = \frac{P}{\rho} = \frac{\lambda \times L_m}{d_m} \times \frac{u_2}{2} \quad (1-2)$$

式中 u_1 为流体在细管内的流速,可取为实际填充床中颗粒空隙间的流速,它与空床流速 u 有如下关系:

$$u_1 = \frac{m}{\epsilon} \quad (1-3)$$

将式 1-1、式 1-3 代入式 1-2 可得：

$$\frac{P}{L} = \left(\frac{\lambda \times L_m}{9L} \right) \frac{(1 - \epsilon \alpha)}{\epsilon^3} \rho u^2$$

虽然细管长度 L_m 与床层高度不等,但却成正比关系,可将其比例系数并入阻力系数,于是:

$$\frac{P}{L} = \lambda' \frac{(1 - \epsilon \alpha)}{\epsilon^3} \rho u^2 \quad (1-4)$$

$$\text{其中 } \lambda' = \frac{\lambda \times L}{\delta L}$$

式 1-4 即为固定床层压降的数学模型,其中包括一个未知数的待定参数 λ' , λ' 称为模型参数,就其物理意义而言,也称为固定床的流动摩擦系数。

3. 模型检验和模型参数的确定。

以上的理论分析是建立在流体力学的一般知识和对实际问题(爬流)相结合的基础上的,也就是一般性和特殊性相结合的结果,这也正是解决多数复杂工程问题的共同基点,二者缺一不可。若忽视了流动的基本原理则找不到解决问题的基本方法,就会走向纯经验化的处理上去;反之,若抓不住爬流的基本特征,就不能进行合理的简化,从而走向教条式的处理上去。

上述流体通过床层的过程简化只是一种假定,还必须通过实验检验其有效性并确定模型参数。

康采尼对此进行了实验研究,发现在流速很低、雷诺数 $Re' < 2$ 的情况下,实验数据可较好地符合下式:

$$\lambda' = K' / Re'$$

式中 K' 称为康采尼常数,其值为 5.0, Re' 称为床层雷诺数。

$$\text{Re}' = \frac{d_m u_z \rho}{\mu} = \frac{\rho \mu}{\alpha(1 - \epsilon \mu)}$$

对于各种床层,康采尼常数的误差不超过 10%,说明上述的简化模型是实际过程的合理简化,于是在确定模型参数 λ' 的同时,也对简化模型的合理性进行了检查。

对比因次分析方法和数学模型方法可知,前者决定成败的关键在于能否如数地列出影响过程的主要因素,并不要求研究者对过程的内在规律有深刻的理解,只要做若干析因实验,考察每个变量对实验结果的影响程度即可。在因次分析法指导下的实验研究,只能得到过程的外部联系,而对过程的内在规律则了解不深,如同黑箱,正是这一特点,使因次分析法成为各种研究对象原则上皆适用的一般方法。而数学模型法成败的关键,在于对复杂过程能否都得到一个足够简单,既可用数学方程表示而又不失真的物理模型。要做到这一点,必须对过程的内在规律特别是过程的特殊性有深刻的理解。数学模型法也离不开实验,但其实验的目的与因次分析法有着很大的不同,后者的实验目的是为了寻找各无因次变量之间的函数关系,而前者是为了检验物理模型的合理性并测定模型参数,显然检验性的实验要比搜索性的实验要简易得多,从这方面看来,数学模型法也更具有科学性,但是探讨过程的内在规律要远比寻找外部联系困难,使数学模型法的应用受到一定的限制。所以应根据实际研究情况选择因次分析法或数学模型法,二者相辅相成,各有所长。

(三) 直接的实验方法

当受条件限制不能采用因次分析法或数学模型法解决某一工程问题时,可采用直接的实验方法,也即对被研究的对象进行直接的观察与实验。此种方法结果可靠,通常只能得出个别量之间的规律关系,难以把握住现象的全部本质,并且其结果只能推广到和实验条件完全相同的过程和设备上,应用时具有很大的局限性。

三、化学工程基础实验课程的内容及教学要求

化工实验具体实验的内容包括:流体流动型态的观察与测定;管道流动阻力的测定;流量计的标定;柏努利方程实验;离心泵特性曲线的测定;板框过滤实验;传热实验;干燥实验;流化干燥实验;吸收实验;筛板塔精馏实验;筛板塔的流体力学实验;电除尘与旋风分离实验。要完成各个实验的全过程,往往是比较花费时间的,且各个学校的设备与各专业的要求也不尽相同,故对实验课程内容的选择与安排,可根据实际情况进行灵活掌握。

在实验中也经常查阅某些介质及设备的各种参数,所以把实验中常用的数据作为附录附在书后,以供查阅。

化学工程基础实验多数是采用工程装置来进行实验,学生们也是第一次碰到这样大型的实验装置,他们往往感到很新鲜,但又无从下手。另外,实验本身及设备的限制,多数设备需要几个人协同才能完成,这样也易导致部分同学有依赖心理。所以要注意培养学生进行实验组织、测量技术、数据处理及实验中理论联系实际等多种能力的培养。为了达到预期的效果,其具体教学要求如下:

(一)实验前的预习

学生在实验前要认真阅读实验指导书及有关参考书,弄清本次实验的目的与要求、研究实验的方法与原理,弄清应该测量哪些数据,并估计实验数据的变化规律,对实验中用到的测量仪表也要预习其结构及使用方法。同时要画好实验数据记录表格。

对已有计算机辅助教学手段的单位,先让学生通过计算机仿真实验,熟悉实验的操作步骤、注意事项及可能的实验结果。

通过预习和计算机仿真实验,写出预习报告。报告内容主要包括实验目的与任务、实验方法及理论依据、实验设备及流程。到实验现场后再观察实验设备流程、仪表的安装位置,经指导老师检查提问后方可进行实验。

(二) 实验操作训练

由于多数实验是由几个人共同完成的,所以在实验时要进行合理的分工与合作,使大家在保证实验质量的同时,又能得到全面的训练。实验方法应该在实验小组内讨论,使得人人知晓,各负其责,并由一人来协调执行。在实验进行到适当的时间后,各岗位可相互轮换,以便使每人都能得到训练的机会。而对某些要求较高的实验,可以在进行正式实验之前的演习时加以训练,而在实验中不进行轮换。

实验操作是一个既动手又动脑的重要过程,要求学生一定要按照实验操作规程进行。凡是影响实验结果的数据都应认真测取,有些数据是直接测取的,如设备有关尺寸、物料性质及操作数据等;而有些数据则不必直接测取,如水的粘度、密度等物理性质,只要测出水温,就可查手册或用经验公式算得。在进行某一项数据的测量时,要安排好测点的范围、测点的数目及适当划分测点疏密程度。操作时要求细心平稳,在事先拟好的表格内记下各项物理量的名称、表示符号、单位及实验现象。每个学生都有一个实验记录本,决不应该随便记在零散纸张上,以免丢失而使数据的完整性受到影响。

在实验过程中,一般情况下,条件改变后,要等读数和现象稳定后才能读取数据,并进行复核。因为有些现象需要一定的稳定时间,且大多数仪表通常都有滞后现象。在读取数据时,一般要记录至仪表上最小分度以下一位数,以便精确地反映仪表的精确度。对实验中的不正常现象及有明显误差的数据,也应如实记录,并加以注释、分析说明产生不正常现象的原因,在实验报告中提出自己的看法或结论,学生应该在实验操作中注意培养自己严谨认真的科学态度。

(三) 实验后书写实验报告

实验后所得到的数据,若不进行处理、分析总结是无多大意义