



吉首大学

JiShou University

《食品化学与分析实验》

# 实验指导书

(食品科学与工程专业用)

麻成金 黄群, 等编

吉首大学教务处实践科

2005年8月

# 目 录

实验一	食品水分活度(A <sub>w</sub> )的测定.....	1
实验二	果胶的提取及果冻制作.....	3
实验三	羧甲基纤维素的制备.....	5
实验四	淀粉醋酸酯的制备及粘度测定.....	7
实验五	卵磷脂的提取、鉴定和应用.....	12
实验六	从牛奶中分离奶油、酪蛋白和乳糖.....	14
实验七	多酚氧化酶活性的测定.....	17
实验八	从鸡蛋清中制备溶菌酶.....	20
实验九	类胡萝卜素的提取.....	24
实验十	从竹叶中制取叶绿素铜钠.....	26
实验十一	食品香气形成途径实例实验.....	28
实验十二	食品调香、调味实验.....	29
实验十三	食品抗氧化剂 BHT 的合成及其抗氧化性能测试.....	31
实验十四	美拉德反应初始阶段的测定.....	34
实验十五	设计性实验.....	36

## 实验四 淀粉醋酸酯的制备及粘度测定

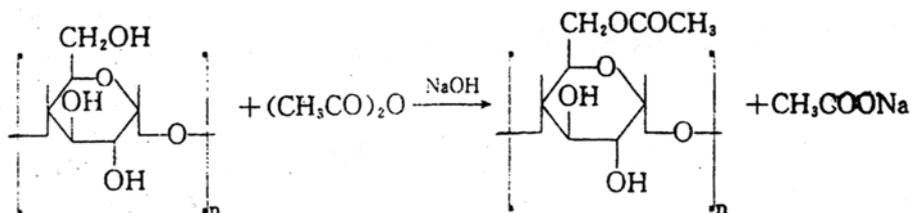
### 一、实验目的

通过实验，进一步加深对淀粉改性相关知识的理解；掌握淀粉改性的常用方法和实验操作技术，以及改性淀粉粘度的测定方法。

### 二、实验原理

通过化学、物理和生物化学等方法来改进淀粉的特性，以强化或抑制淀粉的某些原有特性或增添新的特性，称淀粉改性。淀粉改性及其应用有助于发展淀粉深加工，提高淀粉的经济价值。

用乙酸酐对淀粉进行酯化，制备淀粉醋酸酯，是淀粉改性中常见的一种。其一般的反应式如下：



酯化反应一般是用试剂处理含固体量 35~45%的淀粉悬浮液，而反应条件的选择是要使淀粉不胶凝，并使产物能成颗粒状分离出来。以便于洗涤和干燥。产物的性质与其取代度 (D.S) 有关 (取代度是指每个脱水葡萄糖单位上取代基的平均数)。

普通商业产品是在 pH7~11，25℃淀粉与乙酸酐作用得到 D.S 为 0.5 的淀粉醋酸酯。

低取代度的淀粉醋酸酯具有较低的糊化温度，并在成糊和冷却后，具有良好的抗老化性能，由于其糊状物的稳定性和透明性，在食品中常用于做馅饼、布丁、肉制品等添加剂。高取代度产品则降低形成凝胶的能力。

对于不同种类的淀粉，在不同浓度时，将其悬浮液加热到 55~80℃时，会使淀粉颗粒结合在一起的氢键减弱，并迅速进行不可逆溶胀。发生这种现象的临界温度称为糊化温度(或胶凝温度)，当对混合物继续加热和搅拌时，淀粉因吸水，体积膨胀数十倍。继续加热，淀粉胶束全部崩溃，淀粉分子形成单分子，并为水包围，而成为液体状态，结果形成具有粘性的糊状溶液(称淀粉糊化)。因此，淀粉悬浮液加热时测量其粘度和稠度

的变化，对估计某种淀粉或改性淀粉的有用性质，是具有实际意义的。常用粘度测定仪器来观测这些变化。在未达糊化或胶凝温度之前，淀粉悬浮液的粘度不受温度的影响，当达到胶凝温度后，粘度则明显上升(如图 1)。因此，可用粘度开始增大时的温度来表示凝胶温度。一般未加工的玉米淀粉的胶凝温度为 62~72℃，而其衍生物则随 D.S 的增加，胶凝温度下降。

粘度测定：

测定液体或塑性流体的粘度有如下三种基本方法。

(1) 自毛细管流出法；(2) 旋转粘度计法；(3) 落球、落针、升泡等方法。

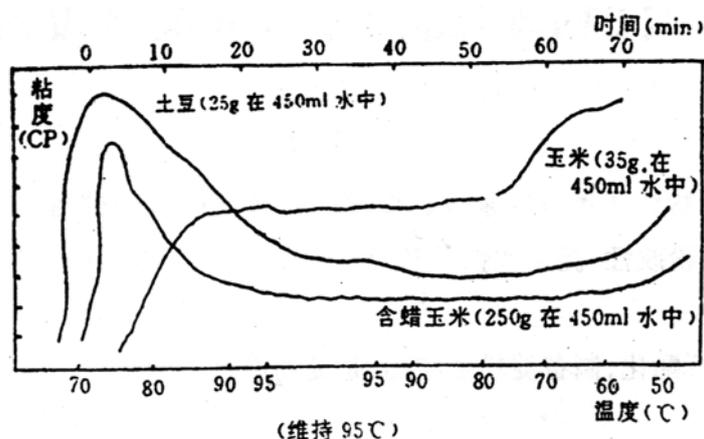


图 1 淀粉悬浮液热煮和冷却时粘度的变化

### 1、流出法原理

当液体在毛细管内流动时，据 Poiseuille 定律，粘度为( $\eta$ )为：

$$\eta = \frac{\pi \rho \gamma^4 t}{8VL} = \frac{\pi h d g r^4 t}{8VL}$$

其中： $h$  为流体高度， $d$  为密度， $t$  为流动时间， $g$  为重力速度， $r$ 、 $V$ 、 $L$  分别为毛细管半径、容积和长度。考虑到液体离开毛细管时还带有一些动能，此式又修正为：

$$\eta = \frac{\pi h d g r^4 t}{8VL} - \frac{m d v}{8\pi L t}$$

其中  $m$  是一个常数，一般可当它是 1，在实际中，则上式常简化为： $\eta = Cdt - Bd/t$

其中  $C$ 、 $B$  要用两种标准液体校正求得。

对于流出法，液体流出的小孔实际上是一根极短的毛细管，但流动条件不符合 Poiseuille 定律所假定的条件，所以不能用 Poiseuille 定律直接计算粘度，而用上述获得相对粘度的公式的实用形式  $\eta = Cdt - Bd/t$  来表示其测得的粘度。实际中让粘度计设计得

B 很小，t 很大，于是，就直接用定量液体流出所用的秒数(t)来表示相对粘度了。

## 2、旋转式粘度计(NDJ-1 型)原理

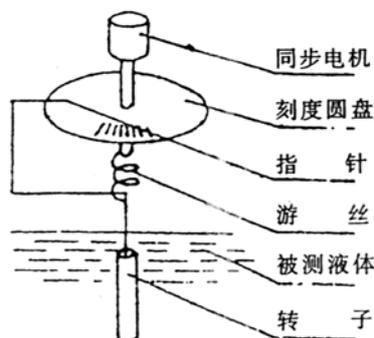


图 2 旋转式粘度计示意图

如图 2 所示，同步电机以稳定的速度旋转，连接刻度圆盘，再通过游丝和转轴带动转子旋转。如果转子未受到液体阻力，同游丝、指针与刻度盘同速旋转，指针在刻度盘上指出的读数为“零”。反之，如果转子受到液液体的粘滞阻力，则游丝产生扭矩，与粘滞阻力抗衡最后达到平衡，这时与游丝连接的指针在刻度圆盘上指示一定的读数(即游丝的扭转角)。将读数乘以特定的系数即得到液体的粘度(mpa·s)。

粘度计算如下：

$$\eta = k \cdot \alpha$$

式中： $\eta$  是绝对粘度；K 是系数(由系数表中查取)； $\alpha$  为指针所指读数(偏转角度)；

## 三、实验材料、试剂和仪器

玉米淀粉；乙酸酐；3%NaOH；2MHCl

250mL 三颈瓶；滴液漏斗；电动搅拌器；抽滤瓶；布氏漏斗；，旋转粘度计或毛细管粘度测定装置。

## 四、实验内容

### 1、淀粉醋酸酯的制备

在装有搅拌器 250mL 三颈瓶中加入玉米淀粉 60g，水 67mL，搅拌成均匀淀粉浆，滴加 3% NaOH 调节 pH≈8，在搅拌下从滴液漏斗慢慢滴加乙酸酐 6mL，同时滴加 3% NaOH 溶液，保持 pH≈8.0~8.4，控制反应温度在 25~40℃(室温)，当乙酸酐加完后，继续搅拌 0.5~1 小时。用 2MHCl 调节 pH 为 4.5，过滤，用少量水洗涤，干燥得产品，计算产率。

### 2、粘度的测定

(1) 流出法(毛细管粘度计): 分别称取原料淀粉和淀粉醋酸酯产品各 5g, 配成 100mL 悬浮液, 搅拌均匀后放恒温水浴锅中。分别测定 60℃、65℃、70℃、75℃、80℃ 时液面从刻度 90 落到 20 所需的时间(或用旋转粘度计测定), 每次测定前应在该温度下恒温 5 分钟以上, 并搅拌均匀。

(2) 旋转法(旋转粘度计): 同(1)方法准备被测液体, 然后将其置于直径不少于 70mm 的 400mL 烧杯中或直筒形容器中, 准确地控制被测液体温度。将保护架装在仪器上, 将选配好的转子旋入连接螺杆(自左旋入装上, 向右旋出卸下), 旋转升温旋扭, 使仪器缓慢下降, 转子浸入被测液体中, 使转子液面标志与液面相平为止, 调整仪器水平。按下指针控制杆, 开启电机开关, 转动变速旋扭, 使所需转速数向上, 对准速度指示点, 放松指针控制杆, 使转子在液体中旋转(一般 20~30 秒), 待指针趋于平稳, (或在规定的时间内进行读数)按下指针控制杆, 使读数固定下来, 再关闭电机, 使指针停在读数窗内, 读取读数。

3、作时间—温度曲线, 估计胶凝温度。

## 五、注意事项

1、当转速较快时(30rpm, 60rpm), 为了精确读数, 要利用指针控制杆。按下指针控制杆时, 不宜用力过猛。但转速较慢时, 可不用控制杆, 而直接读数。

2、读取读数时, 当电机关停后, 如指针不处于读数窗内, 可继续按下控制杆, 反复开启和关闭电机, 直至指针能停于读数窗内, 然后读数。

3、当指针所指读数值过高或过低时, 可变换转子和转速, 务必使读数约在 30~90 格之间为佳。

4、当使用 0 号转子低粘度液测试时, 外试筒(有底)内只能注入 20~25mL 被测液体。当将外试筒套入固定套筒, 并用试筒固定螺钉旋紧时, 必须注间试筒固定螺钉之锥端应旋入外试筒上端之三角形槽内(可以利用侧面之圆孔观察试筒三角槽是否位于圆孔中心)。

5、本仪器适于常温下使用, 并在规定的频率和电压允许范围内测定, 否则会影响测理精度。

6、在测定时, 尽可能使仪器保持水平和稳定, 而且装上转子后不得将仪器侧放或倒放。

7、不得在未按下指针控制杆时开动电机, 一定要在电机运转时变换转速。

8、装上号转子后，不得在无液体情况下旋转，以免损坏轴尖。

9、每次使用完毕应及时清洗转子，但不得在仪器上进行转子清洗耳恭听，清洁后，要妥善安放于转子架内。

10、在使用过程中，应保持仪器的清洁，尤其是连接螺杆和转子连接端面及螺纹处，以及转子本身。

## 六、思考题

1、通过本实验，结合食品化学的有关知识，试述玉米改性淀粉有哪些特性？

2、用旋转法测粘度时，使用旋转粘度计的过程中主要应注意哪些问题？

## 实验七 多酚氧化酶活性的测定

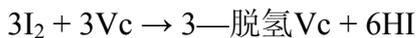
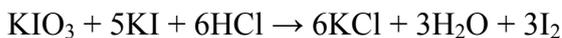
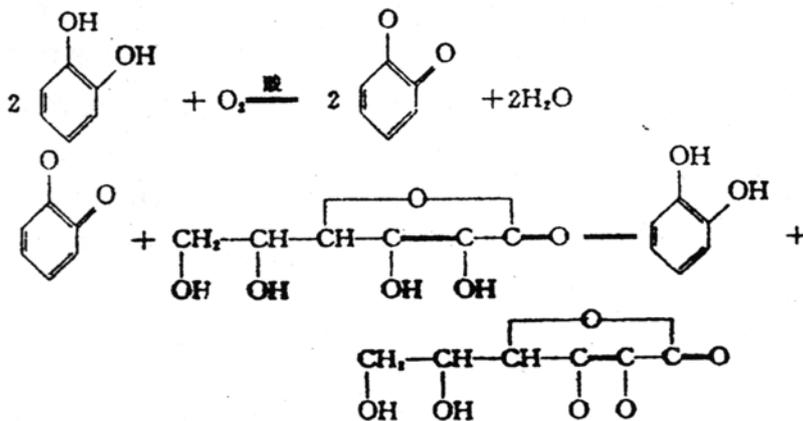
### 一、实验目的

多酚氧化酶是引起果蔬褐变的主要酶之一，学习它的活性测定对于果蔬加工采取合理的护色措施具有指导意义。

### 二、实验原理

邻苯二酚在该酶催化下受O<sub>2</sub>作用生成邻苯二醌能够被抗坏血酸还原，如抗坏血酸充足，少量邻苯二酚可反复不断地被氧化还原。由于该酶最适pH为6，因此这一过程在pH6时最快。

把分析对象配成pH6左右的样液，在抗坏血酸和邻苯二酚存在时，于20℃下振荡2分钟，这时抗坏血酸被氧化。精确的经过2分钟后加入偏磷酸以终止反应。用碘酸钾进行滴定，测得剩余的抗坏血酸。由得到的数据求出被氧化的抗坏血酸量，并计算出酶活性以1克分析物质1分钟内氧化抗坏血酸的微克分子数表示之。所有上述过程的主要式如下：



### 三、实验材料、试剂和设备

苹果；马铃薯；研钵；烧杯；50毫升量瓶；250毫升三角瓶；秒表；滴定管；温度计。

0.2%邻苯二酚溶液：用粗天平称0.2克邻苯二酚，溶解于蒸馏水，稀释到100毫升，

(准备用的前 1—2 天配制).贮于棕色玻璃瓶中,放在冷凉处。

0.01N碘酸钾溶液：用分析天平精确称取 0.3566 克 $KIO_3$ 予先在  $102^\circ C$ 烘 2 小时，在干燥皿中冷却备用），用蒸馏水溶解 1 升的容量瓶中，加 5 毫升 1N的NaOH溶液（此时加碱是为了使 $KIO_3$ 和KI在该试剂中暂不反应）和 2 克KI，溶解，用蒸馏水稀释到刻度，混匀，保存于棕色瓶中。

pH6.4 的磷酸缓冲液，称取 $KH_2PO_4$ 盐 5.44 克溶解到无碳酸的水中，加 10 毫升 1N的NaOH溶液，用无碳酸的水稀释至 200 毫升，保存于玻璃瓶中。

0.04 抗坏血酸溶液：用粗天平称取 0.35 克抗坏血酸溶解到蒸馏水中,用水稀释至 100 毫升，混匀，溶液只能用一天。

5%的偏磷酸溶液：50 克偏磷酸(经验式 $HPO_3$ )溶解到蒸馏水中，稀释至 1 升后混匀，保存于磨口玻璃瓶中。

0.5%可溶性淀粉。

#### 四、实验内容

称 2 克新鲜的植物材料，加蒸馏水于瓷研钵中研细，转移到 100mL 容量瓶，混匀。充分振荡勿使沉淀下沉，吸 10 毫升这种悬浮液，倒入 150 毫升三角瓶中。加入 1 毫升 pH6.4 的磷酸缓冲液，再加入 5 毫升 0.04N 的抗坏血酸溶液，混匀。加入 5 毫升 0.2%的邻苯二酚溶液，同时开始计时并充分振荡。为使空气中的氧气不断进入溶液一直要均匀地振荡 2 分钟。经精确作用 2 分钟，加入 5 毫升 5%的偏磷酸溶液以停止反应（整个实验都应在  $20^\circ C$  下进行。即各种试剂 样液都预先放到  $20^\circ C$  环境中，实验也在  $20^\circ C$  环境下进行，加入偏磷酸量还可根据自己的摸索而定）。加入 1 毫升 0.5%的淀粉溶液，用 0.01N 碘酸钾溶液滴定抗坏血酸的剩余物直到兰色不消失为止。

同时进行对照滴定。为此吸取 10 毫升悬浮液注入另一只三角瓶中，加 5 毫升偏磷酸，再加入 1 毫升pH6.4 磷酸缓冲液，5 毫升 0.4N抗坏血酸，再加淀粉液，也用 0.01NKIO<sub>3</sub> 滴定溶液。

#### 五、计算多酚氧化酶活性

$$A = (100 \times 5(a-b)) / (10 \times n \times 2) = 25(a-b)/n$$

式中：A——多酚氧化酶活性（1 克分析物质， $20^\circ C$  下，1 分钟氧化抗坏血酸的微克分子数）：

100——分析材料悬浮液的总体积（毫升）； N——分析材料的重量（克）

10——测定酶活性所取的悬浮液体积； 2——反应时间（分）；

A——用于滴定对照的 0.01NKIO<sub>3</sub>溶液体积（毫升）；

B——用于样品滴定的 0.01NKIO<sub>3</sub>溶液体积（毫升）；

5——0.01N 抗坏血酸溶液每 mL 换算为微克分子数抗坏血酸的系数  
(0.00088/0.000176)。

## 六、思考题

1、你能列出几种破坏多酚氧化酶活性的方法吗？

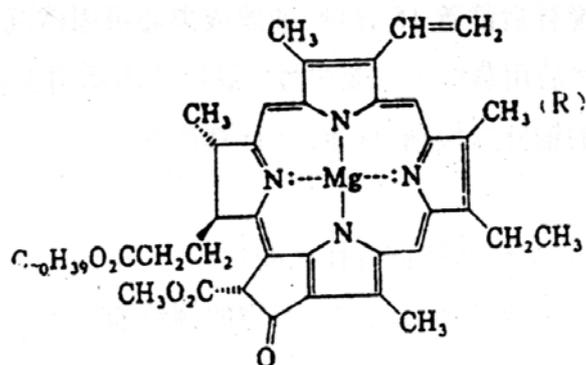
## 实验十 从竹叶中制取叶绿素铜钠

### 一、实验目的

通过本实验，进一步加深对叶绿素及其衍生物性质的理解，掌握叶绿素铜钠的制取方法。

### 二、实验原理

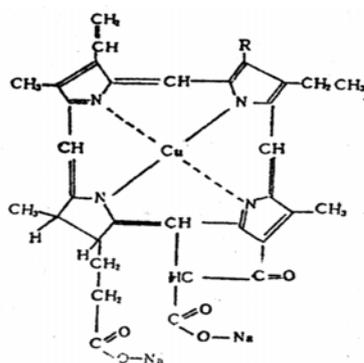
叶绿素是存在于植物体内的一种绿色色素，在植物中与蛋白质形成叶绿体。叶绿素是由叶绿酸与叶绿醇和甲醇所形成的酯，其结构如下：



天然提取的叶绿素含有叶绿素 a（蓝绿色）和叶绿素 b（黄绿色）一般为 3：1。

叶绿素 a: R=CH<sub>3</sub>      叶绿素 b: R=CHO。它们可用层析分离。

游离的叶绿素很不稳定，对光、热敏感，易氧化裂解而褪色。故用做食品添加剂有其局限性。将叶绿素用碱水解，除去甲基和叶绿醇基，并将部分的或全部的中心离子镁被铜取代生成叶绿素铜钠，稳定性增加，做为食用绿色素，可用于胶姆糖胶基着色、果蔬加工品和海带制品等。LD<sub>50</sub>≥400mg/kg（小鼠，静脉注射）叶绿素铜钠的结构式如下：



铜叶绿酸钠分子结构

### 三、实验材料和试剂

新鲜竹叶；氢氧化钠的 60%乙醇溶液；硫酸铜；0.1M 醋酸。

### 四、实验步骤

称取 10g新鲜竹叶，洗净，放于pH=10 的 150mLNaOH水溶液中沸腾 5min，再哟内清水漂洗数次，剪碎后放入 100mL烧瓶中，加入NaOH的 60%乙醇溶液（pH~14）70mL，加热回流 45min。用少量棉花于玻璃漏斗中过滤，得绿色滤液。往滤液中边搅拌边滴入 20%的CuSO<sub>4</sub>溶液，pH=4.5，充分搅拌后静止 15min抽滤或离心得固体沉淀。沉淀用 0.1M 醋酸洗至无Cu<sup>2+</sup>（用铜试剂检验），然后用蒸馏水洗至中性。最后把固体用少量的 2%NaOH溶解，于水蒸气浴上蒸干便得深绿色的叶绿素铜钠，称重，并计算产率。

### 五、思考题

- 1、叶绿素在酸条件下加热，结构和颜色有什么变化？
- 2、叶绿素在碱性性条件下加热，发生什么反应，产物的颜色如何？

## 实验十五 设计性实验

### 一、实验目的

1、使食品化学的单元知识与实验技能得到巩固、充实和提高，提高综合分析和解决问题的能力；

2、培养学生初步开展食品化学方向研究性实验的能力，为以后毕业论文与毕业设计地开展打下坚实基础。

### 二、开展设计性实验的原则

开展设计性实验的主要目标是培养学生独立思考和独立操作能力，以及理论联系实际和融会贯通的能力。整个实验过程应遵循以学生为主、教师为辅的原则，即教师根据教学大纲的要求，提出实验的选题方向、目的和要求、基本程序和考核目标，而实验过程从选题、资料查阅、实验方案制定、实验内容确定、分析方法的选择、实验开展以及实验结果分析评价均由学生独立完成，教师作必要的指导和评价。

### 三、设计性实验的实施步骤

#### 1、选题

本设计性实验的主要目标是巩固并充实已学过的食品化学知识，因而要适中，不宜太大，主要设立一些能结合运用已经学过的其他学科的理论知识和研究方法，并结合实验室现有条件，在4~5天内可以完成的题目。通过完成设计性实验，提高综合分析问题、解决问题的能力 and 实际操作技能。

#### 2、文献资料查阅及综述

学生通过查阅与选题紧密相关的文献资料，特别是电子文献资料，对相关的研究动态、研究成果和技术成就进行系统的分析研究，进而归纳整理写成800~1000字的文献综述。

#### 3、实验方案制定

对学生而言，设计性实验是带有研究性质的实验，实验开始前必须制定详细的实验研究方案。制定方案时，要反复推敲，认真考虑方案的合理性和可行性；然后确定具体实验项目及其前后的次序，并可采用一定的数学模型（如正交实验、均匀设计实验等）来制定研究方案。实验方案最后由实验指导老师审阅，经修改后方可确定下来。

#### 4、开展实验研究

实验研究是设计性实验的中心环节。必须以严谨的科学态度对待实验研究工作，充分发挥学生的主观能动性，培养观察力、想象力和逻辑思维判断力，对实验中出现的各种现象和实验数据进行分析评价。可按如下三个步骤开展。

(1)实验准备。包括实验用试剂、材料及仪器设备的准备，必须引起足够的重视。

(2)预备实验。在正式开展实验前，对一些实验应进行预备实验，主要是进行实验方法的筛选和熟练，为正式实验做好准备。

(3)正式实验。严格按实验方案和方法进行操作，在实验过程中要做到如下四点。第一，要做到观察的客观性，即要如实反映客观现象；第二，要做到观察的全面性，即从各个方面观察实验过程中出现的各种现象，并把各有关因素联系起来，分清主次，把握实质；第三，要做到观察的系统性，即要连续、完整地观察实验全过程，不能随意中断；第四，要做到观察的辩证性，应充分考虑观察的典型性、偶然性和观察的条件，如时间、温度、反应状态等。

#### 5、实验数据处理

运用已学过的数据处理理论和方法，对实验结果进行整理、分析和归纳，在此基础上通过逻辑思维，找出内在规律，为撰写设计性实验报告做准备。

#### 6、设计性实验研究报告

以实验型研究小论文的形式来书写设计性实验研究报告，主要包括前言、材料与方  
法、结果与讨论和结论四个部分。

### 四、选题指南

- 1、PG 在油脂中的抗氧化效果实验
- 2、果蔬真空冷冻干燥实验
- 3、超声波辅助提取花椒挥发油实验
- 4、超临界二氧化碳萃取核桃油实验
- 5、水分活度  $A_w$  对食品产品贮藏稳定性的影响实验
- 6、蛋白质功能性质在食品加工中的应用实验
- 7、不同提取方法对植物色素提取效果的影响实验
- 8、绿色蔬菜加工过程中失绿机制及其控制实验
- 9、果蔬制品褐变机制及其防止实验



吉首大学

JiShou University

《化工原理实验》

# 实验指导书

(化学、应用化学、化学工程与工艺、食品科学与工程、  
环境科学、环境工程、生物工程等专业使用)

邹晓勇编

吉首大学教务处实践科

2005年8月

# 目 录

实验须知 .....	3
<b>第一章 实验数据的计算与处理</b> .....	<b>6</b>
<b>第二章 实验内容</b> .....	<b>16</b>
实验一 雷诺实验 .....	16
实验二 柏努利实验 .....	18
实验三 流体流动阻力多功能实验 .....	20
实验四 离心泵性能测定 .....	24
实验五 板框过滤实验 .....	28
实验六 非均相气固分离实验 .....	32
实验七 传热实验 .....	34
实验八 精馏实验 .....	37
实验九 填料吸收实验 .....	45
实验十 振动筛板萃取实验 .....	49
实验十一 干燥实验 .....	54
实验十二 膜分离实验 .....	58
<b>第三章 实验室用测量仪表</b> .....	<b>60</b>
第一节 压力测量 .....	60
第二节 温度测量 .....	62
第三节 其他仪表 .....	65

# 第一章 实验数据的计算与处理

进行化工原理实验，首先遇到的是实验设备的使用问题，其次是测取数据的问题，第一个问题散见于各个实验中。下面介绍带有共性的问题，例如，应该测取哪些数据？如何读取和记录？记录的数据又如何整理、分析为实验结论等等。

## 一、实验中应测取哪些数据

1、凡是影响实验结果或者数据整理过程所必需的数据，都必须测取。它包括大气条件、设备有关尺寸、物料性质及操作数据等。

2、有些数据不必直接测取，可以从测取的某一数据导出或从手册中查到。例如测出水温后，可查出水的粘度和密度等数据。

## 二、读取和记录数据应注意的问题

1、事先必须拟好记录表格，表格应简明扼要而又符合实验内容的标题名称。

2、表格中应注明各项物理量的名称、符号及单位。化工数据中，有的数量很大或很小，如二氧化碳的亨利系数 $E$ ，用科学记数法表示： $20^{\circ}\text{C}$ 时， $E=1.42\times 10^{-8}[\text{Pa}]$ 。当列表时，项目名称写为 $E\times 10^{-8}$ ，单位记作 $[\text{Pa}]$ ，而表中数字写为 1.42，即 $E\times 10^{-8}=1.42[\text{Pa}]$ 。也可以如下法表示，项目名称为 $E$ ，单位记作 $[\times 10^{-8}\text{Pa}]$ ，表中数字仍为 1.42。

3、实验时一定要等操作稳定后，才开始读数，条件改变后，要等操作再次稳定后再读数，不稳定情况下所读取的实验数据是不可靠的。

4、数据记录必须真实地反映仪表的精确度。一般要记录至仪表上最小分度以下一位数。例如温度计最小刻度为  $1^{\circ}\text{C}$ ，读出某一温度应为  $25.5^{\circ}\text{C}$ ，若温度恰好在  $25^{\circ}\text{C}$ ，也应写为  $25.0^{\circ}\text{C}$ ，有效数字为三位。

5、实验直接测量或计算的结果，该用几位数字表示，是件很重要的事。有人认为数值在小数点后面的位数越多越准确，其错误在于没有弄清小数点的位置与所用测量单位的大小有关，而与测量的准确性无关。例如长度记录为  $0.314\text{m}$ 和  $314\text{mm}$ ，其准确度完全相同。还有人认为，计算结果保留位数越多越准确，其错误在于不了解在一定仪表条件下，所测得数据只能具有一定的准确度，绝不应该过多地保留位数，以致使计算的准确度超过测量仪器的精度。例如传热实验中，蒸汽温度 $T=120.5^{\circ}\text{C}$ ，空气进、出口温

度为 24.4℃和 79.7℃，则对数平均温度差 $\Delta t_m=64.6^\circ\text{C}$ 。若保留位数过多，写作 $\Delta t_m=64.55^\circ\text{C}$ ，则超出了温度计的测量精度，是不科学的。

### 三、实验数据的处理

记录下的原始数据通常要进行运算，或以列表法表示，或以图示法表示，或以经验公式表示。因此，取得实验数据后，还要正确地处理这些数据，才能获得应有的结果。

#### 1、数据的运算

(1) 在计算中应注意有效数字和单位换算。

(2) 数据运算中应采用常数归纳法，即计算公式中的许多常数归纳为一个常数对待。例如管路计算中，由于流量改变而导致雷诺准数的改变，因为

$$\text{Re} = \frac{du\rho}{\mu}, u = \frac{Vs}{\frac{\pi}{4}d^2}, \text{故 } \text{Re} = \frac{4\rho Vs}{\pi d\mu} = B \cdot Vs。$$

计算时先求出B值，依次代入 $V_s$ ，即可求出相应的Re值。

#### 2、数据处理

##### (1) 列表法

利用列表法表达实验数据时，表头栏目应写明所测物理量名称、符号、单位，自变量选择时最好能使其数值依次等量递增。

##### (2) 图示法

利用图示法表示实验数据有许多优点。首先它能清楚地显示所研究对象的变化规律与特点，如极大、极小、转折点、周期性等。其次可利用足够光滑的曲线，作图解微分和图解积分。第三可通过适当地坐标变换，求出经验方程式。图示法在化学工程实验数据整理中具有特殊重要的地位。下面将列专题介绍。

##### (3) 经验公式法

实验数据用经验公式表达，使实验规律更加定量化。经验公式本身是客观规律的一种近似描述，是进一步探讨的线索和依据。

建立经验方程式的基本步骤如下：

- ①将实验测定的数据加以整理与校正。
- ②选出自变量和因变量，并绘出曲线。
- ③由曲线的形状，根据解析几何的知识，判断曲线的类型。

④确定公式的形式，并将曲线通过改变坐标方法，变换成直线关系。常见例子如表 1 所示。

⑤用图解法或解析法来决定经验公式中的常数。

表 1 坐标变换示例表

方 程 式	变 换	直线化后的方程
$Y=ax^b$	$Y=\lg y, X=\lg x$	$Y=bx+\lg a$
$Y=ab^x$	$Y=\lg y, X=x$	$Y=\lg bx+\lg a$
$Y=ae^{bx}$	$Y=\ln y, X=x$	$Y=bx+\ln a$
$Y=e^{a+bx}$		$Y=bx+a$
$Y = \frac{1}{a+bx}$	$Y=\ln y, X=x$	
	$Y = \frac{1}{Y}, X = x$	$Y=bx+a$
$Y = \frac{x}{a+bx}$	$Y = \frac{x}{y}, X = x$	$Y=bx+a$

【示例 1】在蒸汽—空气换热实验中，要将给热系数 a 与管内流速 u 的关系，整理成如下形式：

$$\frac{ad}{\lambda} = A \cdot \left(\frac{du\rho}{\mu}\right)^n \quad \text{即 } Nu = AR_e^n$$

式中：a，管壁对空气的给热系数，W/(m<sup>2</sup>.K)；

λ，空气的导热系数，W/(m.K)；

d，管内径，m；

u，空气流速，m/s

ρ，空气密度，kg/m<sup>3</sup>；

μ，空气粘度，kg/(m.s)；

Nu，努塞尔特准数；

Re，雷诺准数；

A、n，经验公式的系数。

数据记录如表 2 所示。

表2 传热数据记录表

序号	流量示值 R, mm	计前表压 P <sub>表</sub> , Pa	热电偶示值, Et, mV		
			蒸汽或壁	空气进口	空气出口
1	70.0	4080	5.332	1.006	3.348
2	50.0	3906	5.338	0.986	3.40
3	35.0	4599	5.338	1.03	3.478
4	25.0	5093	5.34	1.05	3.54
5	15.5	5960	5.342	1.096	3.624
6	8.5	6440	5.332	1.112	3.708

管径  $d=0.0178\text{m}$ ，管长  $L=1.224\text{m}$ ；流量系数  $C'=0.001233$ ；室温  $t=13^\circ\text{C}$ ；大气压强  $P_a=101330\text{Pa}$ 。

以第一组数计算举例。

$$\Delta t_m = \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{78.6 - 24.9}{\ln \frac{120.4 - 24.9}{120.4 - 78.6}} = 65.0$$

$$\rho = 1.293 \times \frac{P_a + P_{\text{表}}}{101330} \times \frac{273}{273 + t}$$

$$= 1.293 \times \frac{101330 + 4080}{101330} \times \frac{273}{273 + 24.9}$$

$$= 1.233\text{kg/m}^3$$

$$G = V_s = C' \sqrt{R\rho} = 0.001233 \sqrt{R\rho}$$

$$= 0.001233 \sqrt{70.0 \times 1.233} = 0.01145\text{kg/s}$$

$$\text{Re} = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{4G}{\pi d\mu} = 71.53 \frac{G}{\mu}$$

$$= 71.53 \times \frac{0.01145}{1.97 \times 10^{-5}} = 4.157 \times 10^4$$

$$\text{Nu} = \frac{a \cdot d}{\lambda} = \frac{d}{\lambda} K = \frac{d}{\lambda} \cdot \frac{Q}{\Delta t_m \cdot S}$$

$$= \frac{d}{\lambda \cdot \Delta t_m} \cdot \frac{GCp(t_2 - t_1)}{\lambda \cdot \Delta t_m}$$

$$= \frac{1}{\pi \times 1.22} \cdot \frac{GCp(t_2 - t_1)}{\lambda \cdot \Delta t_m}$$

$$= 0.26 \times \frac{0.01145 \times 1005(78.6 - 24.9)}{2.837 \times 10^{-2} \times 65} = 87.3$$

所有计算结果见表3。

表3 传热数据整理表

序号	温度, °C			对数平均温差 $\Delta t_m, \text{°C}$	密度 $\rho, \text{kg/m}^3$	质量流量 $G, \text{kg/s}$	雷诺数 $Re$	努塞尔特准数 $Nu$
	蒸汽, T	进口, $t_1$	出口, $t_2$					
1	120.4	24.9	78.6	65.0	1.233	0.01145	41570	87.3
2	120.5	24.4	79.7	64.6	1.234	0.00969	35160	76.3
3	120.5	25.4	81.4	63.0	1.237	0.00811	29301	66.2
4	120.5	26.6	82.7	61.9	1.240	0.00687	24801	57.7
5	120.5	27.4	84.6	60.1	1.246	0.00542	19473	47.4
6	120.5	26.2	86.4	58.6	1.250	0.00402	14443	36.8

用双对数坐标用图, 如图1所示。

由  $Nu = AR^n$

$$\therefore \lg Nu = n \lg Re + \lg A \quad (1)$$

由图1得斜率

$$n = \frac{\text{点1} \bullet \text{2纵坐标对数差}}{\text{点1} \bullet \text{2横坐标对数差}} = \frac{\lg 94 - \lg 38}{\lg 45000 - \lg 15000} = 0.824$$

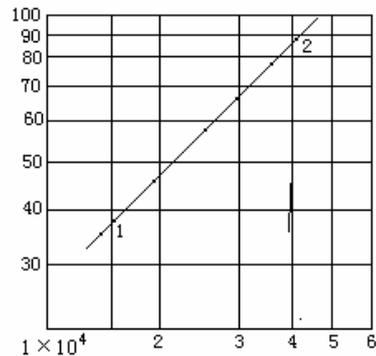


图1 Nu-Re关联图

$$\therefore \lg Nu = 0.824 \lg Re + \lg A$$

将第一组数据代入上式, 则

$$\lg A = \lg 87.3 - 0.824 \times \lg 41570 = -1.865$$

$$\therefore A_1 = 0.0136$$

分别将第二组至第六组数据代入, 求得  $A_2, A_3, \dots$ , 取平均值,  $A = 0.0138$

$$\therefore Nu = 0.0138 Re^{0.824} \quad (2)$$

式(2)是用图解法得到的经验公式。此式亦可用最小二乘法计算。首先将方程(1)线性化处理:  $\ln Nu = n \ln Re + \ln A$

令  $y = \lg Nu$ ,  $x = \lg Re$ ,  $b = \lg A$

则  $y = nx + b$

这就将指数关系转化为一元线性回归问题, 根据一元线性回归原理:

$$n = \frac{\sum x_i \cdot \sum y_i - N \cdot \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - N \sum x_i^2}$$

$$b = \frac{\sum x_i y_i - n \sum x_i^2}{\sum x_i}$$

式中：N,数据的组数，此题中 N=6。

我们根据表 3 中的 Re~Nu 的 6 组数据，分别将 Re 与 Nu 取自然数，然后计算有关项目，并列在表 4 中。

表 4 最小二乘法计算表

序号	$x_i = \ln Re$	$y_i = \ln Nu$	$x_i^2$	$x_i y_i$
1	10.635	4.467	113.11	47.509
2	10.468	4.335	109.579	45.379
3	10.285	4.193	105.781	43.121
4	10.119	4.055	102.394	41.033
5	9.877	3.859	97.555	38.115
6	9.578	3.606	91.738	34.538
	$\sum x_i = 60.961_i$	$\sum y_i = 24.514$	$\sum x_i^2 = 620.147$	$\sum x_i y_i = 249.684$

$$\therefore n = \frac{60.961 \times 24.514 - 6 \times 249.684}{(60.961)^2 - 6 \times 620.147} = 0.80$$

$$b = \frac{249.684 - 0.80 \times 620.147}{60.9961} = -4.04 = \ln A$$

$$A = e^{-4.04} = 0.0175$$

$$\therefore Nu = 0.0175 Re^{0.80} \quad (3)$$

比较 (2) 和式 (3)，说明无论是图解法还是回归分析法，所得经验公式是一致的。

#### 四、实验数据的图示法

常选横轴为自变量，纵轴为因变量。坐标分度的选择，要反映出实验数据的有效数字位数，并要求方便易读。分度坐标不一定从零开始，而应使图形占满坐标纸为宜。同一幅面上，可以有几种不同单位的纵轴的分度。不同纵轴的分度，应使曲线不至于交叉重叠。

1、直角坐标图示法。化工原理实验中的干燥速率曲线、泵性能曲线和过滤曲线，均采用直角坐标图示法。本书以泵性能曲线的标绘为例，说明直角坐标图示法。

**【示例 2】**泵性能实验测定的数据如表 5 所示。泵入口与出口管径为  $d=0.04m$ ；真空计

与压力表接口的垂直距离为 $h_0=0.1\text{m}$ ；水温 $t=20^\circ\text{C}$ ；查水的密度 $\rho=998\text{kg/m}^3$ 。

表5 泵性能实验数据表

序号	流量 $Q/10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$	真空度 mm	压力 $\text{kg}/\text{cm}^2$	实际功率 N, W	扬程 He,m	有效功率 Ne,W	效率 $\eta, \%$
1	0	83	2.16	403	22.83	0	0
2	0.68	95	2.17	500	23.09	154	30.75
3	0.96	100	2.17	553	23.16	218	39.36
4	1.65	119	2.15	698	23.42	378	54.20
5	2.07	135	2.07	780	22.64	459	58.81
6	2.77	168	1.89	902	21.28	577	64.00
7	3.46	215	1.64	1007	19.42	658	65.33
8	4.72	317	1.07	1143	15.11	698	61.09

以第二组数据计算举例。由于 $u_1 = u_2, \sum h_f = 0$ 。

$$\begin{aligned}
 He &= h_0 + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \sum h_f \\
 &= 0.1\text{m} + 0 + \text{压力计读数} \times 10 + \text{真空计读数} \times 13.6 \\
 &= 0.1 + 2.17 \times 10 + 0.095 \times 13.6 \\
 &= 23.09\text{m} \\
 Ne &= QHe\rho g = QHe \times 998 \times 9.81 \\
 &= 9.79 \times 10^3 QHe \\
 &= 9.79 \times 10^3 \times 0.68 \times 10^{-3} \times 23.09 = 154\text{W}
 \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{Ne}{N} = \frac{154}{500} = 30.75\%$$

将表5中数据： $He \sim Q, N \sim Q, \eta \sim Q$ 分别标绘在图2中，得到泵性能曲线。

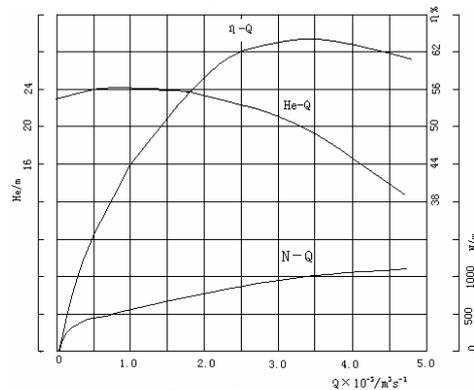


图2 泵性能曲线

2、双对数坐标图示法。一般是横坐标与纵坐标均采用常用对数分度，在化学工程实验中应用十分广泛。例如，流体流动阻力实验中的  $\lambda \sim \text{Re}$  曲线，吸收实验中  $\Delta p \sim u$  曲线，传热实验中的  $\text{Nu} \sim \text{Re}$  曲线等等，均采用双对数坐标图示法。下面以流体流动阻力实验中  $\lambda \sim \text{Re}$  曲线的标绘为例，说明双对数图示法。

**【示例 3】**流体阻力实验测定的数据，如表 6 所示。管内径  $d=0.04\text{m}$ ；直管压点距离  $l=4\text{m}$ ；水温  $t=20^\circ\text{C}$ 。

表 6 阻力测定数据表

序号	流量 $V_s \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$	U 管压差 $R, \text{mm}$	雷诺数 $\text{Re}$	直管压降 $\Delta p, \text{Pa}$	摩擦系数 $\lambda$
1	3.5	81	110845	10013.5	0.0257
2	2.5	42	79062	5192.2	0.0262
3	2.0	27	63260	3337.8	0.0264
4	1.75	21	55224	2596.1	0.0269
5	1.5	16	47278	1978.0	0.0279
6	1.25	12	39332	1483.5	0.0303
7	1.0	8	31784	989.0	0.0310
8	0.75	5	23838	618.1	0.0343

以第三组数据计算举例。水温  $20^\circ\text{C}$  时，查手册得： $\mu=1.005 \times 10^{-3} \text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ； $\rho=998.2 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

$$\therefore \text{Re} = \frac{d u \rho}{\mu} = \frac{4 \rho}{\pi d \mu} V_s = \frac{4 \times 998.2}{\pi \times 0.04 \times 1.005 \times 10^{-3}} V_s$$

$$= 3.163 \times 10^7 V_s = 3.163 \times 10^7 \times 2 \times 10^{-3} = 63260$$

$$\Delta p = R g (\rho_0 - \rho) = 9.81 (133600 + 998.2) R$$

$$= 1.236 \times 10^5 R = 1.236 \times 10^5 \times 0.027 = 3337.8 \text{N}/\text{m}^2$$

$$\therefore h_f = \lambda \frac{l u^2}{d} = \frac{\Delta p}{\rho}$$

$$\therefore \lambda = \frac{2 d \Delta p}{\rho \cdot l u^2} = \frac{\pi^2 d^5}{8 \rho l} \cdot \frac{\Delta p}{V_s^2} = \frac{\pi^2 \times 0.04^5}{8 \times 998.2 \times 4} \cdot \frac{\Delta p}{V_s^2}$$

$$= 3.16 \times 10^{-11} \frac{\Delta p}{V_s^2} = 3.16 \times 10^{-11} \frac{3337.8}{2^2 \times 10^{-6}} = 0.0264$$

将计算结果也列在表 6 中，并将  $\lambda \sim \text{Re}$  关系，在双对数坐标纸上，标绘在图 3 中。

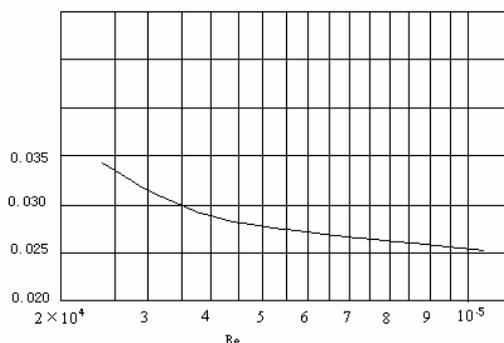


图 3  $\lambda \sim Re$  关联图

3、半对数坐标图示法。一般是横轴采用常用对数或自然对数分度，而纵坐标采用直角坐标分度。下面以孔板流量计的校正曲线为例，说明半对数坐标图示法。

**【示例 4】**流量计校正实验测定的数据如表 7 所示。管径 $d=0.028\text{m}$ ；孔板内径 $d_0=0.028\text{m}$ ；孔板内径 $d_0=1.398 \times 10^{-3}\text{m}$ ；水温 $t=19^\circ\text{C}$ ；查得水的密度 $\rho=998.2\text{kg/m}^3$ ；水的粘度 $\mu=1.03 \times 10^{-3}\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ；计量槽底的面积 $0.5 \times 0.3=0.15\text{m}^2$ 。

表 7 流量计的测定数据表

序号	流 量				压差计 R,mm	雷诺数 Re	孔流系数 $C_0$
	计量槽水位高, m	体积 $\text{m}^3$	时间 s	流量, $V_s, \text{m}^3/\text{s}$			
1	0.20	0.03	25	0.0012	5799	51600	0.653
2	0.20	0.03	25.5	0.00117	543	512000	
3	0.33	0.0495	43	0.00115	525	51000	0.657
4	0.30	0.045	41.5	0.00108	458	47500	0.661
5	0.20	0.03	30	0.0010	381	44000	0.671
6	0.20	0.03	40	0.00075	229	33000	0.649
7	0.20	0.03	45	0.00067	172	29500	0.669
8	0.20	0.03	56.5	0.00053	110	23500	0.661

以第二组数据计算举例。  $\therefore V_s = C_0 S_0 \sqrt{\frac{2gR(\rho_0 - \rho)}{\rho}}$

$$\therefore C_0 = V_s / (S_0 \sqrt{\frac{2gR(\rho_0 - \rho)}{\rho}})$$

$$= V_s / \left[ \frac{\pi}{4} \times (13.98 \times 10^{-3})^2 \times \sqrt{\frac{29.81(13600 - 998.2)}{998.2}} \sqrt{R} \right]$$

$$\therefore C_0 = 413.94 \frac{V_s}{\sqrt{R}} = 413.94 \frac{0.00117}{\sqrt{0.543}} = 0.657$$

$$Re = \frac{d u \rho}{\mu} = \frac{4 \rho}{\pi d \mu} V_s = \frac{4 \times 998.2}{\pi \times 0.028 \times 1.03 \times 10^{-3}} V_s$$

$$= 4.41 \times 10^7 V_s = 4.41 \times 10^7 \times 0.00117 = 5.16 \times 10^4$$

将计算结果也列在表 7 中，并将 $C_0 \sim R_e$ 关系，在半对当选坐标纸中，标绘在图 4 中。

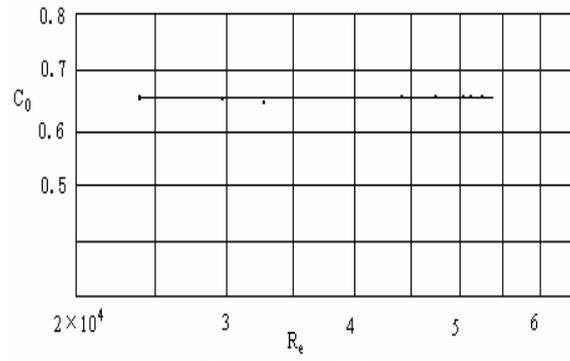


图 4  $C_0 \sim R_e$  关联图

# 实验三 流体流动阻力多功能实验

## 一、实验目的

- 1、掌握流体阻力及一定管径和管壁粗糙度下摩擦系数  $\lambda$  的测定方法
- 2、掌握测定局部阻力系数  $\zeta$  的方法
- 3、掌握摩擦系数  $\lambda$  与雷诺数  $Re$  之间的关系及工程意义

## 二、实验原理

流体阻力产生的根源是流体具有粘性，流动时存在内摩擦。而壁面的形状则促使流动的流体内部发生相对运动，为流动阻力的产生提供了条件，流动阻力的大小与流体本身的物理性质、流动状况及壁面的形状等因素有关。流动阻力可分为直管阻力和局部阻力。

流体在流动过程中要消耗能量以克服流动阻力，因此，流动阻力的测定颇为重要。测定流体阻力的基本原理如图所示，水从贮槽由离心泵输入管道，经流量计计量后回到水槽，循环利用。改变流量并测定直管与管件的相应压差，即可测得流体流动阻力。

### 1. 直管阻力摩擦系数 $\lambda$ 的测定

直管阻力是流体流经直管时，由于流体的内摩擦而产生的阻力损失  $h_f$ 。对于等直径水平直管段，根据两测压点间的柏努利方程有：

$$h_f = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2g}$$
$$\lambda = \frac{2d(P_1 - P_2)}{\rho l u^2} \quad (1)$$

式中：l，直管长度，m

d，管内径，m

$(P_1 - P_2)$ ，流体流经直管的压强降，Pa

u，流体截面平均流速，m/s

$\rho$ ，流体密度， $\text{kg/m}^3$

$\mu$ ，流体粘度，PaS

由式 (1) 可知，欲测定  $\lambda$ ，需知道 l、d、 $(P_1 - P_2)$ 、u、 $\rho$ 、 $\mu$  等。

(1) 若测得流体温度，则可查得流体的  $\rho$ 、 $\mu$  值。

(2) 若测得流量，则由管径可计算流速 u。

(3) 两测压点间的压降  $(P_1 - P_2)$ ，可用 U 型压差计测定。此时：

$$\Delta P = \rho g R \quad (2)$$

式中：R，U 型压差计中水银柱的高度差，m

则：

$$\lambda = \frac{2d}{\rho u^2} \rho g R \quad (3)$$

## 2. 局部阻力系数 $\zeta$ 的测定

局部阻力主要是由于流体流经管路中管件、阀门及管截面的突然扩大或缩小等局部位置时所引起的阻力损失，在局部阻力件左右两侧的测压点间列柏努利方程有：

$$h'_f = \frac{p'_1 - p'_2}{\rho g} = \zeta \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (4)$$

$$\text{即 } \zeta = \frac{2(p'_1 - p'_2)}{\rho u^2}$$

式中： $\zeta$ ，局部阻力系数

$P'_1 - P'_2$ ，局部阻力压强降，Pa

式（4）中  $\rho$ 、 $u$ 、 $P'_1 - P'_2$  等的测定同直管阻力测定方法。

## 三、实验操作步骤

- 1、了解实验装置，熟悉实验各装置的作用和原理。
- 2、进一步熟悉离心泵的操作。
- 3、检查水槽水量是否够用，必要时应为水槽加水；如实验时间稍长，水槽水量不够，可以向水槽加自来水，水位过高时即从溢流口流入地沟，便可保证水槽的水量。
- 4、开始实验前先灌泵，避免在空载状态下开车。打开电源开关，关闭泵出口阀，打开泵电源开关。打开连通阀，将泵出口阀打至最大，等待几分钟后关闭出口阀，反复开关管子上部的排气阀对管子进行排气。
- 5、在连通阀打开的情况下将排空阀开关几次对测压管进行排气。关闭连通阀再开排空阀几次对压差计调零。
- 6、将流量由小逐渐加大，流量每变一次需等待几分钟到压差计内读数稳定，记录下 U 型管的液柱高度差。
- 7、流量在增加过程中，其流速开始时增加的间隔较为缓慢，一般为 10L/h。当流量增大到 150L/h 后，便以 50L/h 的流速来增加。
- 8、在实验过程中，U 型管液柱高度差应当是逐步增加的，不符合这一规律，应当从流量为最大值时开始，逆向操作（即逐步减少流量），直至流量为零为止。此时，U 型管液柱高度差应当是逐步减少的。
- 9、如果实验结果符合正常实验规律，即可终止实验。先关闭水的出口阀，再停泵，最后关闭电源开关；

10、局部阻力系数的测定与直管阻力的测定方法一样，只是通过转向阀使液体流入弯管。

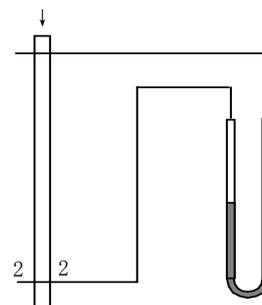
11、打扫实验室卫生，整理好原始记录，交实验指导老师签字后再离开实验室。

#### 四、实验注意事项与设备的维护保养

1、装置配备的U型管压差计内的指示液为水，20℃时密度为  $998.2\text{kg/m}^3$ 。

2、本装置的直管为垂直安装，与U型管压差计相连的两测压点垂直距离为1054mm，直管内径为15mm，绝对粗糙度  $\varepsilon=0.2\text{mm}$ ；

直管垂直安装，测压点测量的应为两截面间的势能差，包括了两者的代数和为  $\Sigma\Delta P = (P_2 - P_1) + \rho g\Delta Z$ 。显然， $\Delta P_S = \Sigma H_f = \lambda L \rho u^2 / (2d)$ ， $\rho g\Delta Z$  则应为常数，且当  $u=0$  时， $\Delta P_S = \Sigma H_f = 0$ ， $\Sigma\Delta P$  取最大值，即  $\rho g\Delta Z$ （此值可通过实验测定）。因此，实际的直管阻力  $\Sigma H_f = \rho g\Delta Z - \Sigma\Delta P$ 。本实验装置的数据还可以用于验证层流条件下  $\lambda$  与  $Re$  数的关系。



3、设备的维修主要是料液泵，具体要求请参照泵的使用说明书和有关的电机手册；

4、设备使用一段时间后，如果管道连接件泄漏，可用维修的活动扳手禁锢连接螺母；

5、加密封生料带之后再紧锢，还不行，则必须更换管道接头或管道；

6、注意实验过程中切勿捕捉测量点，只能从大到小测，或从小到大有规律的测，若少测了数据则需重新开始实验。不能将流量打回所需测的数值另读一组数据。否则数据将有很大的偏离。

#### 五、实验结果处理与要求

1、根据实验所测项目，设计原始数据记录表格。

2、验证层流时  $\lambda \sim Re$  的关系。

3、湍流时，流量由小（大）到大（小）测 8~10 组数据，计算  $\lambda$ 、 $\zeta$ 、 $Re$  值。

4、在双对数坐标纸上绘出  $\lambda \sim Re$  曲线，并与书上  $\lambda \sim Re$  比较是否相符？

5、局部阻力原始记录表格与下表一致。

原始记录表格

温度：            液体粘度：            液体密度：            管子内径：

体积流量 $V(\text{m}^3/\text{h})$	流速 $u(\text{m/s})$	$P_1(\text{m})$	$P_2(\text{m})$

### 思考题

- 1、管路要排气，若气未排尽，对实验结果有何影响？
- 2、本实验数据为什么要整理成  $\lambda \sim \text{Re}$  曲线，而不整理成  $\lambda \sim u$  线？
- 3、不同流体、不同管径及不同温度下的  $\lambda$ 、 $\text{Re}$  数据能否关联到一条曲线上，为什么？
- 4、测压导管的粗细、长短对测量两点的压力差有无影响？
- 5、滞流、湍流、完全湍流（阻力平方区）时，摩擦系数  $\lambda$  与  $\text{Re}$ 、 $\epsilon/d$  各为何关系？

## 实验六 非均相气固分离实验

### 一、实验目的

- 1、观察含粉尘的气流在旋风分离器内的运动状况
- 2、了解旋风分离器的除尘原理
- 3、了解气固分离效率的测定以及粒级效率的测定

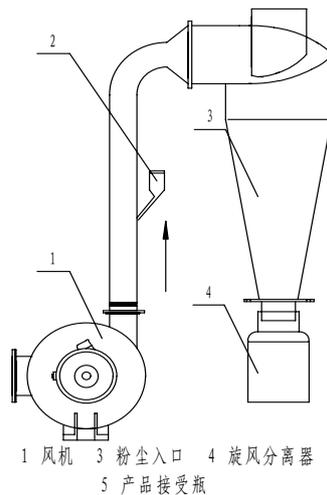
### 二、实验原理

含尘气体由旋风分离器上部沿切线方向的长方形通道进入，形成一个绕筒体中心向下作螺旋运动的外旋流，外旋流达到器底后又形成一个向上的内旋流，内、外旋流气体旋转方向相同。在此过程中，颗粒在惯性离心力作用下被抛向器壁与气流分离，并沿壁面落入锥底排灰口。净化后的气体沿内旋流由顶部排气管排出。

$$\eta = \frac{m_{\text{分离}}}{m_{\text{进}}}$$

粒级效率按分离颗粒的分离情况分别计算。

### 三、工艺装置



### 四、实验操作步骤及注意事项

- 1、了解该实验的流程，称量粉尘的重量以及产品接受瓶的空瓶重量。打开电源开关再开风机开关。
- 2、打开粉尘入口，将粉尘加入后盖好；观察其在旋风分离器内的运动形态（注意

在加料的过程中由于进料口较小，所以加料的速度较慢，可以轻轻拍打加料瓶的外表面加快其进料速度)。

3、将产品接受瓶与里面的粉尘一同称重，记下所得的读数。可计算出分离效率。

4、将接受瓶内的粉尘用不同目的筛将其分离，并一一称其重量，记于记录本上。用坐标纸描点即可得其粒级效率。

5、若细小的硅胶粒子无法被分离与净化气一起从顶部排气口排出，能加深学生对临界粒径的理解。

## 五、 实验数据处理

1、将原始数据列成表格。

2、根据实验结果做出分级效率曲线、粒级效率曲线。

### 思考题

1、为什么进气口要在筒壁的切线方向而不在径向方向？

2、通过实验可知哪些指标是用来判断旋风分离器分离性能好坏的？

3、临界粒径指的是什么？

4、为什么离心分离器的总分离效率  $\eta_0$  不能准确的表示出其分离性能的好坏？

5、气体通过旋风分离器的压降大些好还是小些好？

# 实验九 填料塔吸收实验

## 一、实验目的

- 1、了解填料吸收塔的结构和基本流程
- 2、熟悉填料吸收塔的操作
- 3、观察填料吸收塔的流体力学行为并测定在干、湿填料状态下填料层压降与空塔气速的关系
- 4、测定总传质系数  $K_{ya}$ ，并了解其影响因素

## 二、基本原理

气体吸收是常见的传质过程，它是利用液体吸收剂选择性吸收气体混合物中某种组分，从而使该组分从混合气体中得以分离的一种操作。

对稳定的低浓度物理吸收过程，根据吸收过程的物料衡算及传质速率方程有：

$$V(Y_1 - Y_2) = K'_{ya} \Omega \cdot Z \cdot \Delta Y_m$$

故

$$K'_{ya} = \frac{V(Y_1 - Y_2)}{\Omega \cdot Z \cdot \Delta Y_m}$$

式中： $V$ ，通过吸收塔的惰性气体量即空气的摩尔流量， $\text{kmol/h}$

$Y_1$ 、 $Y_2$ ，气相入口、出口溶质摩尔比， $\text{kmol 溶质/kmol 惰性气体}$

$\Omega$ ，塔的有效吸收面积即塔的截面积， $\text{m}^2$

$Z$ ，填料层高度， $\text{m}$

$\Delta Y_m$ ，对数平均推动力

可见，通过测定操作过程吸收系统的 $V$ 、 $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $\Omega$ 、 $Z$ 及 $\Delta Y_m$ ，即可计算出 $K'_{ya}$ 值。

### (1) 空气流量 $V$ 的测定

空气流量按下式计算即可：

$$Q_o^{air} = C \cdot Q_o^{air} \cdot \frac{T_o}{P_o} \sqrt{\frac{P \cdot P_1}{T \cdot T_1}} \quad \text{及} \quad V = \frac{1}{22.4} Q_o^{air}$$

式中： $T_o$ 、 $P_o$ 、 $Q_o^{air}$ ，空气在标准状态下的温度、压力、流量， $\text{K}$ 、 $\text{Pa}$ 、 $\text{m}^3/\text{h}$

$T$ 、 $P$ 、 $Q^{air}$ ，转子流量计标定状态下空气的温度、压力、流量，单位同上

$T_1$ 、 $P_1$ ，空气进入转子流量计前的温度、压力， $\text{K}$ 、 $\text{Pa}$

$C$ ，转子流量计系数，本实验为 1.00

$V$ ，空气的摩尔流量， $\text{Kmol/h}$

(2) 溶质（气体）入塔浓度  $Y_1$  的测定

$$Y_1 = \frac{P_{\text{丙酮}}}{P_{\text{air}}} \quad \text{或} \quad Y_1 = \frac{P_{\text{丙酮}}}{P_T - P_{\text{丙酮}}} \quad \text{kmol } NH_3 / \text{kmol air}$$

式中：  $P_T$  ，入塔前混合气体总压（Pa），本装置可设定在 0.02MPa（表压）左右

$P_{\text{丙酮}}$ ，入塔温度  $t$  下丙酮分压，可近似认为丙酮在  $t$  温度下达到饱和，其饱和蒸汽压服从 Antoine 方程： $\ln P_{\text{丙酮}} = A - B/(C+1)$ ，式中  $P_{\text{丙酮}}$ 、 $t$  单位分别为 mmHg 及  $^{\circ}\text{C}$ ，常数 A、B、C 分别为 16.6513、2940.46 和 237.22。

此外，亦可由气相色谱法进行定量分析。

(3) 尾气出塔浓度  $Y_2$  测定

$Y_2$  由气相色谱仪测定。

$Y_2$  吸收剂出口溶质浓度  $X_1$

$$X_1 = \frac{V(Y_1 - Y_2)}{L} + X_2 \quad \text{kmol 溶质/kmol } H_2O$$

式中：  $L$ ，吸收剂（清水）用量，Kmol/h

$X_2$ ，吸收剂（清水）中溶质浓度（单位同前），本实验中  $X_2=0$ 。

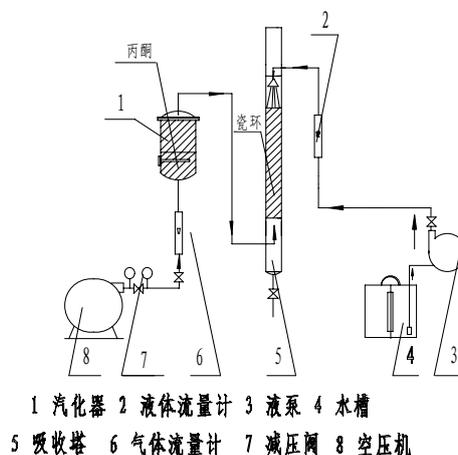
(4) 平衡常数  $m$ 、平衡浓度  $Y^*$ 、对数平均推动力  $\Delta Y_m$  的计算

$$Y^* = \frac{mX}{1 + (1-m)X}$$

$$m^{\text{丙酮}} = \frac{E^{\text{丙酮}}}{P_T} \quad \text{及} \quad E^{\text{丙酮}} = 2.20 + 0.015t + 0.0001t^2 \quad (\text{atm})$$

$$\Delta Y_m = \frac{(Y_1 - Y_1^*) - (Y_2 - Y_2^*)}{\ln \frac{(Y_1 - Y_1^*)}{(Y_2 - Y_2^*)}}$$

### 三、实验装置



## 四、操作步骤

- (1)检查水槽液位是否足够，需要时应为水槽加水。
- (2)检查汽发生器内液位是否在要求的范围内，必要时应为汽化器加丙酮。
- (3)启动空气压缩机，待空压机出口压力达到额定压力后（会自动停机），缓慢打开气体流量计阀门进气，进口压力控制在 0.006MPa，流量控制在 0.04~0.08m<sup>3</sup>/h之间；
- (4)灌泵后打开电源开关，启动泵。
- (5)在 L=0 及 L 为某一定值时，改变 V，分别测定在两种情况下的填料层压降与空塔气速的关系数据。注意观察当 L 一定时，随着 V 的改变，填料塔内流体流动现象。若还未看见液泛现象则可同时加大 L。
- (6)打开吸收塔的水进口阀进水，严格控制料液的流量在 35~45L/h 范围。
- (7)打开丙酮加热开关，打开进气温度控制仪表，将进气温度设定为 50~55℃。
- (8)待操作稳定以后，从塔顶、塔底取样口同时取样分析。
- (9)增加气相流量，重复操作 7 以取得另外一组数据。
- (10)如果分析结果证明，增加气相流量后，塔顶出口气相与塔底出口液相中溶质含量上升，说明实验结果基本合理，吸收实验则已完成。
- (11)关闭进口液相的控制阀终止加料，关闭离心泵电源，关闭进气温度控制器停止加热，待塔内液相全部流完以后再关闭气相进口阀。
- (12)遇紧急情况需直接断电源，但断电后必须把所有的开关和阀都关上。

## 五、数据记录及整理要求

- (1)按照相应实际内容，列出原始数据记录表格；
- (2)作出L=0 时的 $\Delta P-U_{\text{空}}$ 曲线；
- (3)作出L $\neq$ 0 时的 $\Delta P-U_{\text{空}}$ 曲线，并找出泛点气速；
- (4)计算不同操作条件的  $K_y a$ ；
- (5)从以上实验数据及计算结果，归纳总结本实验的主要结论，并讨论分析影响实验结果的主要因素。

## 思考题

1.  $L=0$  时,  $\Delta P-U_{\text{空}}$  曲线与  $L \neq 0$  时的  $\Delta P-U_{\text{空}}$  曲线有什么不同之处?
2. 哪些因素会影响吸收系数  $K_{Y_a}$ , 如何影响?
3. 对于一个既定的吸收塔, 可否允许在小于最小液汽比的情况下操作?
4. 填料吸收塔为什么必须有液封装置, 液封装置是如何设计的?
5. 在吸收塔中有哪些因素可以改动?
6. 本吸收过程是气膜控制还是液膜控制?
6. 当吸收塔排出的吸收液全部或部分循环使用, 会对吸收操作有什么影响?
7. 吸收实验开始前为什么要测定干塔及一定喷淋量  $L$  下, 填料层压降与空塔气速  $\Delta P-U_{\text{空}}$  的关系? 对于  $L \neq 0$  时, 填料层的压降  $\Delta P$  主要来源于哪几个方面?
8. 本实验所测定的为总吸收系数  $K_{Y_a}$ , 此时各分系数分别为多少?
9. 在测定相平衡常数时, 为何要测定吸收液温度而不测入塔气相温度?

# 吉首大学

## 化学实验教学中心实验课程教材目录

### 一、《基础化学实验》

1. 《无机化学实验》(第三版),北京师范大学无机化学教研室等编.北京:高等教育出版社,2001.
2. 《有机化学实验》(第三版),曾昭琼主编.北京:高等教育出版社,2000.
3. 《分析化学实验》(第四版),武汉大学主编.北京:高等教育出版社,2004.
4. 《物理化学实验》(第三版),复旦大学等编.北京:高等教育出版社,2004.
5. 《仪器分析实验指导书》,颜文斌,欧阳玉祝,覃事栋等编.吉首大学教务处,2005.

### 二、《化工原理实验》

- 《化工原理实验指导书》,邹晓勇编.吉首大学教务处,2005.

### 三、《综合化学实验》

1. 《综合化学实验》(讲义),毛宗万等主编.广州:中山大学,2006.
2. 《化学反应工程原理》,张濂,许志美,袁向等主编.上海:华东理工大学出版社,2000.
3. 《精细化工实验指导书》,欧阳玉祝编,吉首大学教务处,2005.
4. 《应用电化学实验指导书》,吴显明,何则强等编,吉首大学教务处,2005.
5. 《材料化学实验指导书》,陈上,刘建本等编,吉首大学教务处,2005.
6. 《植物资源化学实验指导》,陈莉华编,吉首大学教务处,2005.
7. 《综合化学实验》,王伯康主编,南京:南京大学出版社,1999.

### 四、《食品化学与分析实验》

- 《食品化学与分析实验指导书》麻成金,黄群等编.吉首大学教务处,2005.