



世纪高等教育规划教材  
21SHIJIGAODENGJIAOYUGUIHUAJIAOCAI

HUAGONGJICHUSHIYAN

# 化工基础实验

张秀成 赵彬侠 编著

陕西省  
精品课程



西北大学出版社  
NORTHWEST UNIVERSITY PRESS

**图书在版编目(CIP)数据**

化工基础实验/赵彬侠,张秀成编著. —西安:西北大学出版社,2006.11

ISBN 7-5604-2245-4

I. 化... II. ①赵... ②张... III. 化学工程—化学实验—高等学校—教材

IV. IQ016

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 129349 号

**化工基础实验**

张秀成 赵彬侠 编著

---

|      |                          |      |                    |
|------|--------------------------|------|--------------------|
| 出版发行 | 西北大学出版社                  | 社 址  | 西安市太白北路 229 号      |
| 电 话  | (029)-88305287           | 邮政编码 | 710069             |
| 经 销  | 新华书店                     | 印 刷  | 陕西向阳印务有限公司         |
| 版 次  | 2006 年 11 月第 1 版         | 印 次  | 2006 年 11 月第 1 次印刷 |
| 开 本  | 787×1092 1/16            | 印 张  | 12.5               |
| 字 数  | 258 千字                   | 定 价  | 22.50 元            |
| 书 号  | ISBN 7-5604-2245-4/O·142 |      |                    |

---

化工制药类专业是一门实践性极强的工程学科,各类实验教学是使学生实现理论与实际相结合的重要方式,其中的化工基础实验内容更是使学生实现专业学习与全面发展的重要环节。它对于学生加强工程训练和培养操作技能以及综合素质的提高发挥着举足轻重的作用。

“化工基础实验”主要包括化工原理实验和化工专业实验两部分,其中化工原理实验包括化工基础理论(三传)、单元操作、计算机模拟等部分内容,面向化工制药类、化学类以及环境科学与环境工程等专业,综合型、研究型实验主要面向化工制药类专业的学生与研究生,亦可供化学与环境类专业的学生参考。根据各化工院校的教学计划,两部分内容均单独设课,因此选择或编写一本合适的实验教材十分必要。由于近年来各高校的实验设备进行了大幅度的更新,实验设备种类也较多,尽管国内已出版了几种版本的“化工原理实验”“化工基础实验”讲义,但都是“有的放矢”,即针对自己学校的设备编写的,缺乏通用性。另外,由于受学时的限制,许多实验内容无法在教学课时内进行,只能供学生作为选做实验或作为开放实验,一部分作为毕业环节的内容。这些实验设备多是一些大型装置,结构复杂,控制线路较多,进行实验前需要学生进行必要的准备。所以,我们必须根据自己的设备特点和教学大纲,重新编写适合的实验教材。目前我们根据各具体实验环节,组织实验教师编写了各单独实验操作的实验讲义,供学生使用。经过三年的试用修改,编写了这部“化工基础实验”教材。

本书由张秀成、赵彬侠主编,参加教材编写的还有王玉琪、姚瑞清、胡宝林、郑小刚等。马晓迅教授提出了许多宝贵意见。

本书由于编写时间仓促,再加上作者的学识和经验有限,不妥之处,衷心希望读者指正。

# 目 录

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 前 言 .....                      | (1)  |
| 绪 论 .....                      | (1)  |
| 一、化工基础实验的目的 .....              | (1)  |
| 二、化工基础实验的要求 .....              | (2)  |
| 三、化工实验室的安全 .....               | (3)  |
| 第一章 化工原理实验 .....               | (6)  |
| 实验一 流体阻力实验 .....               | (6)  |
| 实验二 流量计的标定实验 .....             | (10) |
| 实验三 离心泵性能测定实验 .....            | (13) |
| 实验四 过滤实验 .....                 | (17) |
| 实验五 对流给热系数测定实验 .....           | (20) |
| 实验六 氧解吸实验 .....                | (24) |
| 实验七 板式精馏塔效率测定实验 .....          | (30) |
| 实验八 常压洞道干燥器干燥实验 .....          | (33) |
| 实验九 流化床干燥实验 .....              | (37) |
| 实验十 雷诺数演示实验 .....              | (42) |
| 第二章 综合型、研究型实验 .....            | (44) |
| 实验一 催化剂比表面积及孔径分布测定 .....       | (44) |
| 实验二 二元气液平衡活度系数测定 .....         | (52) |
| 实验三 催化剂的程序升温脱附(TPD)实验 .....    | (55) |
| 实验四 多釜串联流动反应器停留时间分布的测定 .....   | (58) |
| 实验五 流动边界层及其厚度的测定 .....         | (64) |
| 实验六 冷却塔性能的测定 .....             | (67) |
| 实验七 气流横掠板面对流传热实验 .....         | (70) |
| 实验八 蒸汽喷射致冷机/热泵热力学特性及其测定 .....  | (74) |
| 实验九 实验室精密精馏实验 .....            | (80) |
| 精馏操作实验 1—全塔理论板数测定 .....        | (82) |
| 精馏操作实验 2—95%乙醇恒沸精馏制备无水乙醇 ..... | (85) |

|                                     |              |
|-------------------------------------|--------------|
| 实验十 微分反应器实验—合成甲醇催化剂活性评价 .....       | (87)         |
| 实验十一 甲醇气相脱水制二甲醚反应动力学实验 .....        | (92)         |
| <b>第三章 化工参数测量方法及常用仪器仪表的使用 .....</b> | <b>(101)</b> |
| 第一节 温度测量 .....                      | (101)        |
| 一、玻璃管温度计 .....                      | (102)        |
| 二、热电偶温度计 .....                      | (103)        |
| 三、热电阻温度计 .....                      | (109)        |
| 第二节 压力测量 .....                      | (110)        |
| 一、液柱式压力计 .....                      | (110)        |
| 二、弹性压力计 .....                       | (114)        |
| 三、压强(或压强差)的电测方法 .....               | (115)        |
| 第三节 流量测量 .....                      | (116)        |
| 一、差压式流量计 .....                      | (117)        |
| 二、转子流量计 .....                       | (119)        |
| 三、涡轮流量计 .....                       | (120)        |
| 四、湿式流量计 .....                       | (121)        |
| 五、质量流量计 .....                       | (121)        |
| 第四节 化工基础实验室的常用仪器 .....              | (123)        |
| 一、AI 人工智能调节器 .....                  | (123)        |
| 二、气相色谱分析仪 .....                     | (126)        |
| 三、溶氧仪 .....                         | (128)        |
| <b>第四章 实验误差分析与数据处理 .....</b>        | <b>(132)</b> |
| 第一节 实验数据的采集与运算 .....                | (132)        |
| 一、实验数据的采集 .....                     | (132)        |
| 二、有效数字的运算规则 .....                   | (132)        |
| 第二节 实验数据的误差分析 .....                 | (134)        |
| 一、实验数据的误差来源及分类 .....                | (134)        |

# 目 录

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 二、实验数据的真值与平均值 .....      | (135) |
| 三、误差的表示方法 .....          | (136) |
| 四、实验数据的准确度、正确度和精密度 ..... | (137) |
| 五、间接测量值的误差传递 .....       | (138) |
| 第三节 随机误差的正态分布 .....      | (141) |
| 一、随机误差的正态分布 .....        | (141) |
| 二、概率密度分布函数 .....         | (141) |
| 第四节 实验数据处理 .....         | (144) |
| 一、实验数据的列表法 .....         | (144) |
| 二、实验数据的图示法 .....         | (146) |
| 三、经验公式的选择 .....          | (149) |
| 四、用图解法求经验公式中的常数 .....    | (151) |
| 五、实验数据的回归分析法 .....       | (157) |
| 第五章 实验设计方法 .....         | (165) |
| 第一节 正交实验设计 .....         | (165) |
| 一、正交实验设计方法的特点 .....      | (165) |
| 二、因素之间的交互作用 .....        | (167) |
| 三、选择正交表的基本原则 .....       | (167) |
| 第二节 正交表头设计 .....         | (168) |
| 一、正交表头设计 .....           | (168) |
| 二、正交实验的操作方法 .....        | (169) |
| 第三节 正交实验设计分析方法 .....     | (169) |
| 一、极差分析法 .....            | (170) |
| 二、方差分析法 .....            | (172) |
| 附录 化工原理实验常用数据表 .....     | (175) |
| 参考文献 .....               | (190) |

## 绪 论

化学工程学是一门实验性极强的工程学科,它不仅有完整的理论体系,而且具有一些独特的实验研究方法。化学工程的教学除了系统地讲授基础理论外,各类实验教学也是一项必不可少的实践性教学环节。它使学生实现专业学习与全面发展相结合,通过定向化、具体化、顺序化、次序化的步骤,使学生在时间和空间上从各个方面、各个角度和各种联系中充分运用已有的知识和科学的思维进行全面系统、深入细致的观察,从中发现问题,并寻求解决的途径和方法。因此,在化工专业高级人才的培养中,实验教学具有不可替代的重要作用。

以单元操作为基础的化学工程学科,在工业经济时代向知识经济时代转变的新时期,正在发生着一系列变革。学科的研究内容已从装备水平向分子水平乃至整个宇宙范围内延伸,研究领域也因其具有广泛的外延性而正向环境、生命、材料、能源和信息等领域拓展。在这种交叉发展的学科氛围中,化工学科的未来发展对高级专门人才培养的模式和质量提出了新的挑战。学科发展的态势要求培养的学生既不是性格内向的书生,也不是头脑简单而充满匠气的工程技术人员。新时代呼唤具有扎实基础理论、开拓创新能力和竞争意识的复合型人才。因而在培养模式上要鼓励学生思考、激发学生的想象、注重实践动手能力等综合素质的提高,为学生的全面发展奠定基础。在培养这种创新型人才方面,实验教学环节是使学生实现专业学习与全面发展有机结合的重要方式之一。它可使学生在时间和空间上从各个方面、各个角度和各种联系中充分运用已有的知识和科学的思维进行全面系统、深入细致的观察,从中发现新现象、新问题、新线索。而能够发现新问题则是创新起点。在化工专业高级人才的培养中,化学工程实验学环节具有不可替代的重要作用。它对于学生工程训练的加强和各种技能的培养以及综合素质的提高起着举足轻重的作用。

### 一、化学基础实验的目的

化学工程基础实验虽然是整个化学工程教学的有机组成部分,它作为一门独立的基础课程,应具有自身的教学目的和教学要求。因此,化学工程基础实验的教学目的有如下几个方面。

(1)培养学生从事实验研究的初步能力。在科学实践中,从事实验研究应当具备这样一些能力:①对实验现象有敏锐的观察力;②能够运用各种实验手段正确地获得实验数据;③分析和归纳实验数据并得出结论。而这些能力正是创新型人才所必须具备的基本素质之一,因此,培养学生从事实验研究的初步能力是培养学生创新能力的一种途径。

(2)初步掌握一些有关化学工程学的实验研究方法和实验技术。

(3)培养学生在学习理论课程的基础上,加深对主要原理、方法及重要概念的理解,并能灵活应用这些原理进行化工操作、设计及模拟实验的能力。

各专业的化学工程基础实验课程因学时和各种条件的制约,学生只能在已有的实验

装置和规定的实验条件范围内进行,因此,上述各种能力的培养只能是初步的。若要取得更好的效果,实验应由学生从确定课题、设计实验内容、安装实验装置等做起。为此,除了必做的实验内容以外,还安排一部分选做实验和开放实验,供学有余力的部分学生进行选修,时间可放在本学期或在毕业环节内进行。尽管如此,化工基础实验课程,远不是科学研究方法的全部,也达不到实验研究能力的全面训练,只能是为今后从事科学实验打好基础。

## 二、化工基础实验的要求

化工基础实验是化工制药类专业一门实践性很强的课程,化工基础实验的主要目的是使学生在学习化工传递过程及反应器基本原理的基础上,加深对化工主要原理、方法及重要规律的理解,并能灵活应用这些原理进行化工操作、设计及模拟实验的能力。

认真做好化工基础实验,对培养学生独立从事科学研究,特别是应用性研究的能力具有重要的作用。在实验过程中,学生应明确实验目的,认真进行实验预习、数据记录、实验设计,并完成实验报告,做好每个实验。

### 1. 实验预习

认真预习实验是做好实验的前提,所以要充分预习,具体要求如下:

(1)认真阅读实验指导教材,明确实验的目的、原理及注意事项。

(2)根据实验的具体任务,明确实验的内容和步骤分析,应测定哪些数据,并估计实验数据的变化规律。

(3)在实验现场结合实验指导教材,仔细观查设备流程、主要设备的构造及仪表的种类,了解设备的开启方法及设备的操作注意事项。

### 2. 实验数据的记录

(1)按原始实验数据记录表的要求,记录测定的各项实验数据,并记录实验条件。实验条件一般包括环境条件、仪器设备和药品条件,前者如室温、大气压、湿度等,后者包括使用仪器设备的名称、规格、型号、实验精度以及药品的名称、纯度等。

(2)必须在实验数据稳定后读数,条件改变后也要待一定时间后再读取数据,以排除在管路系统中含有气泡或仪表滞后等引起的读数不准情况发生。

(3)记录实验数据必须准确、可靠,严禁随意涂抹数据,在相同的实验条件下,至少应读取两次数据,而且只有在两次读数相近的情况下才可改变实验条件,进行下一步操作。

(4)数据记录必须真实地反映仪表的精度,一般要记录至仪表最小分度下一位数。

(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. 实验报告的书写

实验完成后要进行实验报告的书写,实验报告是实验工作的全面总结和系统概括。通过书写实验报告,使学生在实验数据处理、作图、误差分析、问题归纳等方面得到全面提高。化工基础实验报告的内容分为:实验目的、基本原理、实验装置流程、实验操作方法、注意事项、原始数据记录、数据处理、作表或图、数据计算过程举例及对实验结果的分析讨论,最后给出实验结论。

实验目的、基本原理、实验装置流程、实验操作方法、注意事项在本书的每一个实验中均

有较为详尽的描述,要求学生在实验开始前对上述内容有充分的了解,以便于更好地完成实验。书写实验报告时要求学生根据自己的实验结果书写,不能照抄书本内容。

记录原始实验数据时,要根据仪表的精度决定实验数据的有效数字位数。进行数据处理时,要求将实验数据整理、加工成表格或图形的形式(参见第五章:实验误差分析与数据的处理),并要求以某一组原始数据为例,列出各项计算过程,说明数据图表中结果的来源。

实验结果的分析讨论非常重要,是学生对基本原理、实验方法及结果进行的综合分析。讨论的内容包括:

- (1)对实验结果从理论上进行分析和解释;
- (2)对实验现象,特别是异常现象的分析讨论;
- (3)对实验结果的误差分析,如何提高测量精度;
- (4)提出进一步的研究方向或对实验方法提出的改进建议等。

此外,在每一个实验后面都附有思考题,旨在加深学生对基本原理的理解,要求学生结合实验并阅读有关资料认真回答。

### 三、化工实验室的安全

化工基础实验是一门实践性很强的基础课程,与四大基础化学实验有所不同,每一个实验都相当于一个小型单元的生产流程,电器、仪表及机械传动设备等组合为一体。要特别注意实验设备及仪表的安全使用。有些实验过程还要在高压、高温、低温或高真空条件下操作,因此,在进行实验操作之前必须掌握实验室在防火、用电、高压钢瓶及化学药品使用等方面的安全知识。

#### 1. 防火安全

化工实验室发生火灾的隐患主要包括易燃化学品及电器设备或加热系统等,在实验操作过程中首先要避免火灾的发生,如在实验室不要存放过多的易燃品,用后及时回收、处理。在实验前要检查电器设备,对已经老化的线路要及时更换。另外必须要熟悉消防器材的使用方法。

一旦发生火情,应该冷静判断情况,采取有效的措施,迅速找来灭火器或消防水龙头等进行灭火,并尽快报警。

#### 2. 用电安全

(1)实验前,必须了解室内总电闸及分电闸的位置,便于出现用电事故时及时切断电源。

(2)接触或操作电器设备时,手必须干燥。不能用试电笔去试高压电。

(3)导线的接头应紧密牢固,裸露的部分必须用绝缘胶布包好或塑料管套好;接头损坏或绝缘不良时应及时更换。进行上述操作或电器设备维修时必须停电作业。

(4)电源或电器设备上的保护熔断丝(或保险管)都应该在规定电流标准内使用,不能任意加大,更不能用铜丝或铝丝代替。所有电器设备的金属外壳应接地线,并定期检查是否连接良好。

(5)启动电动机时,合闸前先用手转动一下电机的轴,合上电闸后,立即查看电机是否已转动;若不转动,应立即拉闸,否则电机很容易烧毁。若电源开关是三相刀闸,合闸时一定要

快速地猛合到底,否则容易发生“跑单项”,即三相中有一相实际上未接通,这样电机极易被烧毁。

(6)若用电设备是电热器,在通电之前,一定要搞清楚进行电加热所需要的前提条件是否已经具备。比如在精馏塔实验中,在接通塔釜电热器之前,必须清楚釜内液面是否符合要求,塔顶冷凝器的冷却水是否已经打开。

(7)在电源开关与用电器之间若有电压或电流调节器时,在接通电源开关前,一定要将电压或电流调节器置于“零位”状态,以保护用电器不被损坏。

### 3. 高压钢瓶的安全使用

气体钢瓶是由无缝碳素钢或合金钢制成的,适用于装介质压力在 15.0MPa 以下的气体。使用气瓶的主要危险是气瓶可能爆炸和漏气。已充气的气体钢瓶爆炸的主要原因是气瓶受热而使其内部气体膨胀,以致压力超过气瓶的最大负荷而爆炸。另外,可燃性气体的漏气也会造成危险,如氢气泄露时,与空气混合后体积分数达到 4.0%~75.2%时,遇明火就会发生爆炸。因而,在使用高压钢瓶时要注意以下事项:

(1)搬运钢瓶时,应戴好钢瓶帽和橡胶安全圈,并严防钢瓶摔倒或受到撞击,以免发生意外事故。钢瓶应远离热源,放在阴凉、干燥的地方。使用时,必须牢固地固定在架子上、墙上或实验台旁。

(2)决不可使油或其他易燃性有机物玷污在气瓶上,特别是出口和气压表处;也不可棉、麻等堵漏,以防燃烧引起事故。

(3)使用钢瓶时,一定要用气压表,而且各种气压表不能混用。一般可燃性气体的钢瓶螺纹是反扣的(如  $H_2$ ,  $C_2H_4$ ),不可燃或助燃性气体的钢瓶气门螺纹是正扣的(如  $N_2$ ,  $O_2$ )。

(4)使用钢瓶时必须连接减压阀或高压调节阀,不经这些部件让系统直接跟钢瓶连接是非常危险的。

(5)开启钢瓶阀门及调压时,人不要站在气体出口的前方,头不要在瓶口上方,以防万一钢瓶的总阀门或气压表被冲出伤人。

(6)当钢瓶使用到瓶内压力为 0.5MPa 时,应停止使用。压力过低会给重新充气带来不安全因素,当钢瓶内的压力与外界压力相同时,会引起空气的进入。

### 4. 汞的安全使用

汞蒸气的最大安全浓度为  $0.01\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;而  $20^\circ\text{C}$  时,汞的饱和蒸气压为 0.2MPa,比安全浓度大 100 多倍。若在一个不通风的房间内,又有汞直接暴露于空气中,就有可能使空气中汞蒸气超过安全浓度,所以必须严格遵守以下有关安全用汞的操作规定:

(1)汞不能直接暴露于空气中,为此,在容器内汞的上面加水或其他液体覆盖,然后再给容器加盖。

(2)取汞时,一定要缓慢倾斜倒出,以免溅出,并在浅搪瓷盘内进行。

(3)实验操作前应检查用汞仪器安放处或仪器连接处是否牢固,及时更换已老化的橡皮管。橡皮管或塑料管的连接处一律用金属束缚牢,以免在实验时脱落使汞流出。

(4)当有汞散落在地上、桌上或水槽等处时,应尽可能地用吸汞管将汞珠收集起来,再用金属片(如  $Zn$ ,  $Cu$ )在汞溅落处多次刮扫;最后用硫磺粉覆盖在有汞溅落的地方,并磨擦之,

使汞变为  $\text{HgS}$ ; 也可用  $\text{KMnO}_4$  溶液使汞氧化。擦过汞的滤纸或布块必须放在有水的陶瓷缸内, 统一处理。

(5) 装有汞的仪器应避免受热, 保存汞的地方应远离热源。严禁将有汞的器具放入烘箱。

(6) 用汞的实验室要有良好的通风设备, 并与其他实验室分开, 经常通风排气。

有关化学药品的安全使用在四大基础化学实验里已有介绍, 这里不再赘述。

## 第一章 化工原理实验

### 实验一 流体阻力实验

#### 一、实验目的

1. 了解流体流经管道时直管阻力及局部阻力的测定方法。
2. 了解流体摩擦阻力系数及局部阻力系数与流动状态的关系。
3. 掌握 U 型管压差计的使用方法。

#### 二、实验内容

1. 测定不可压缩流体在直管内作定态流动时的阻力, 关联摩擦系数  $\lambda$  与雷诺数  $Re$  之间的关系。并将所得光滑管的  $\lambda-Re$  方程(曲线)与柏拉修斯方程(曲线)相比较。
2. 测定在定态流动状态下不可压缩流体通过局部障碍物即管件(弯头、阀门、三通等)的阻力及阻力系数。

#### 三、基本原理

在管内流动的流体, 由于具有粘性, 必须克服内摩擦力做功, 消耗部分能量。当流体呈湍流流动状态时, 流体内部充满了大小旋涡, 流体质点的速度和方向都发生急剧变化, 大大增加质点间的相互碰撞, 引起动量的交换, 产生湍动阻力, 其结果也会消耗流体流量。所以流体的粘性及质点的碰撞产生了流体的流动阻力。

流体流动阻力可分为直管阻力和局部阻力两类。直管阻力(也称沿程阻力)是流体流经一定管径的直管时由于摩擦产生的阻力; 局部阻力是流体在流动时, 由于管道某些障碍物如管件、阀门、流量计等所引起的阻力。

##### 1. 摩擦阻力系数的测定

$$\text{流体流动的直管阻力计算公式: } H_f = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (1-1)$$

式中  $H_f$ ——流体通过直管的阻力, m;

$\lambda$ ——摩擦系数, 无因次;

$L$ ——管道长度, m;

$d$ ——管道内径, m;

$u$ ——流体平均流速, m/s;

$g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

由(1-1)式可知,为求得流体流经直管的阻力,就需确定摩擦阻力系数 $\lambda$ 的值。对于层流,可用理论方法求得 $\lambda = \frac{64}{Re}$ ;但对于湍流,由于其流动机理的复杂性,而且管壁相对粗糙度 $\frac{\epsilon}{d}$ 又各不相同,理论分析是很困难的,主要通过实验及经验数据的整理归纳来提出一般规律。

测定摩擦系数 $\lambda$ 的方法是:

对一段已知长度、管径的直管,在一定的流速的雷诺数下,测出流体的阻力损失 $H_f$ 然后按(1-2)式求出 $\lambda$ 。

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

流速 $u$ 可用流量计测定流量后,由 $q_v = \frac{1}{4}\pi d^2 u$ 求出。

根据柏努利方程,阻力损失 $H_f$ 可由下式求出:

$$H_f = (Z_1 - Z_2) + \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} \quad (1-3)$$

若在一定管径的水平管上选取两个截面,则 $Z_1 = Z_2$ ,  $u_1 = u_2$ , (1-3)式简化为:

$$H_f = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} \quad (1-4)$$

显然,只要测出水平等径直管两端的静压差即可由(1-4)式求出 $H_f$ 。

因此,我们可以在一条等径的水平管道上,选取两个截面(界面间无任何管件),用压差计测出两截面间的静压差,用流量计测出管道中流体的流速,用温度计测出流体的温度,由物性手册中查取流体的密度 $\rho$ 、粘度 $\mu$ ,然后分别求出该条件下的 $Re$ 及 $\lambda$ ;进而改变流速(这是改变雷诺数 $Re$ 的简单方法)得到其他条件下的若干组 $\lambda-Re$ 数据。将这些数据描绘在双对数坐标纸上,从而得到某一相对粗糙度时的 $\lambda-Re$ 关系曲线,为计算直管阻力损失 $H_f$ 提供了数据。

## 2. 局部阻力系数的测定

流体局部阻力计算公式为:

$$H_f = \zeta \frac{u^2}{2g} \quad (1-5)$$

式中  $H_f$ ——流体的局部阻力,  $\text{m}$ ;

$\zeta$ ——局部阻力系数, 无因次;

$u$ ——流体在管道中的平均流速,  $\text{m/s}$ ;

$g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

局部阻力系数 $\zeta$ 的数值根据局部区域的具体情况,由实验求得:

$$\zeta = H_f \frac{2g}{u^2} \quad (1-6)$$

为求得  $H_f$ , 我们选取水平管道上某些管件(如截止阀等)作体系, 对其进行机械能衡算, 则柏努利方程(1-3)式适用。同样, 对于截止阀前后取两个界面, 有  $Z_1 = Z_2$ ,  $u_1 = u_2$ , 于是  $H_f = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$ , 即流体通过截止阀的阻力损失可由流体在其前后的静压差直接求得。

求得阻力损失后, 即可按(1-6)式求得流体通过管件的局部阻力系数。

对于闸阀、弯头、喷嘴、大小头等局部障碍物, 阻力系数  $\zeta$  的测定原理与截止阀相同。

#### 四、实验装置及流程

实验装置及流程见图 1-1。

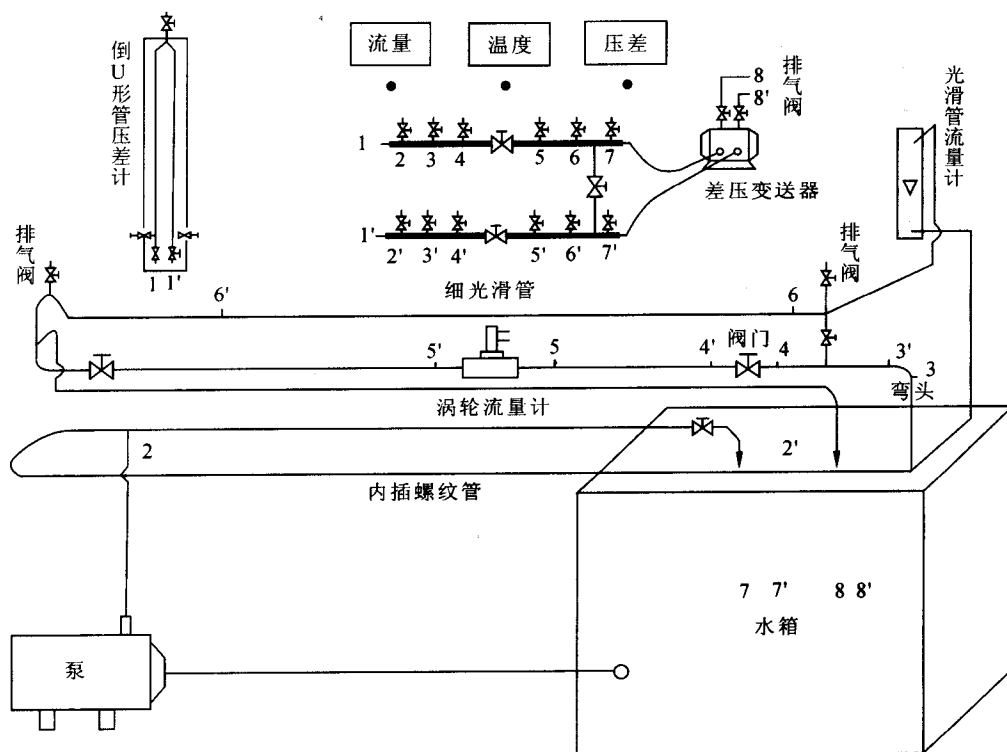


图 1-1 流体阻力实验装置流程

11'-倒 U 型管压差计测压管接 22'-内插螺纹管测压管接 33'-90°弯头测压管接;

44'-阀门测压管接 55'-涡轮流量计测压管接 66'-毛细光滑管测压管接

77'-排气阀排气管接 88'-排气阀排气管接

测量直管阻力的管道有两条, 一条为内径  $d=5.32\text{mm}$  的细光滑管, 水平放置, 两测压孔距离为  $1.5\text{m}$ ; 另一条为平均内径  $d_m=22.5\text{mm}$  的内插螺纹管, 水平放置, 两测压孔距离为  $1.5\text{m}$ ; 测压孔上游设置一段直管道(通常取  $20\sim 40$  倍的管内径), 以消除管件处产生的漩涡。测量局部阻力的管道内径为  $d=22.8\text{mm}$  的钢管, 水平放置, 局部障碍物为闸阀(或截止阀)、涡轮流量计和弯头, 局部阻力上、下游测压孔距离为  $10\sim 15d$  以稳定压力。直管阻力与局部阻力用差压变送器, 在低压差时用倒 U 型压差计测量。测压管线为分组集中式, 用三

通相连,以方便转换测压,每次只能测量一组压差,即选定的两测压点阀门开启,其余测压点阀门关闭。在流体主管线与测压管线上均设有排气阀,以备排气之用。

## 五、实验方法

### 1. 实验要点

(1)熟练实验装置及流程。观察压差计与管道的连接,各测压孔在管道上的位置、编号及在测压汇集总管上的位置、编号,了解每个阀门的作用和用法。

(2)排气:实验前应排出管道系统(包括测压管线)中的空气以稳定压力。

(3)每次调节流速后,必须有适当的稳定时间,等流量、温度、压差计读数稳定后再读取数据。

### 2. 实验步骤

(1)检查实验装置总电源并接通,开启仪表的电源、计算机电源,打开回水调节阀,并关闭倒U型压差计的阀门1,1',启动离心泵。

(2)分别打开阀门组1,1'~8,8',以较大流量排除管路内的气体,使管内流体呈稳定流动状态。

(3)流量分别由小到大进行调节。依次对内插螺纹管、细光滑管、弯头、阀门、涡轮流量计进行摩擦阻力的测定,并记录实验数据。

(4)打开流体阻力测定的软件,鼠标点击内插螺纹管可进行内插螺纹管的计算机数据采集。其他细光滑管、弯头等与内插螺纹管相同。

(5)实验结束后,关闭流量调节阀,关掉泵及关闭计算机电源、总电源。

## 六、实验数据处理

根据测量数据,计算 $Re$ 及 $\lambda$ 值,在双对数坐标纸上描绘二者之间的关系。讨论实验现象和结果,并与教材上图线相比较;根据局部阻力实验数据,计算各障碍物处于不同状态时的阻力系数 $\zeta$ ,并与教材上介绍值相比较。

## 七、思考与讨论

1. 在测量前为什么要将系统中空气排尽?怎样才能迅速地排净?
2. 如何使用倒U型压差计?列举出测量值与压差的计算式。
3. 压差计测压管的粗细和长短对测量两点压力差有无影响?为什么?
4. 在不同设备上(包括相对粗糙度相同而管径不同)、不同温度下测定的 $\lambda-Re$ 数据能否关联在一条曲线上?
5. 测出的直管阻力损失与管路的放置状态如水平、倾斜、垂直等有无关系?为什么?
6. 以水为工作流体所测得的 $\lambda-Re$ 关系能否适用于其他种类的牛顿型流体?为什么?
7. 如果要增加雷诺数的范围,可采取哪些措施?

## 附:实验报告

## 实验名称 流体阻力实验

姓名:

班级:

同组者:

实验日期:

指导教师:

一、实验目的

二、实验内容

三、基本原理(包括基本原理及实验装置图)

四、实验数据与处理

管道内径  $d =$  \_\_\_\_ m, 水温 \_\_\_\_  $^{\circ}\text{C}$ , 水粘度 \_\_\_\_  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ , 水密度 \_\_\_\_  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

测定直管阻力实验数据表

| 序号       | 流量/ $(\text{m}^3/\text{s})$ | 流速/ $(\text{m}/\text{s})$ | $Re$ | 压差/ $(\text{kPa mm H}_2\text{O})$ | $(\Delta P/\rho g m)$ | $\lambda$ | 备注 |
|----------|-----------------------------|---------------------------|------|-----------------------------------|-----------------------|-----------|----|
| 1        |                             |                           |      |                                   |                       |           |    |
| 2        |                             |                           |      |                                   |                       |           |    |
| $\vdots$ |                             |                           |      |                                   |                       |           |    |

## 实验二 流量计标定实验

## 一、实验目的

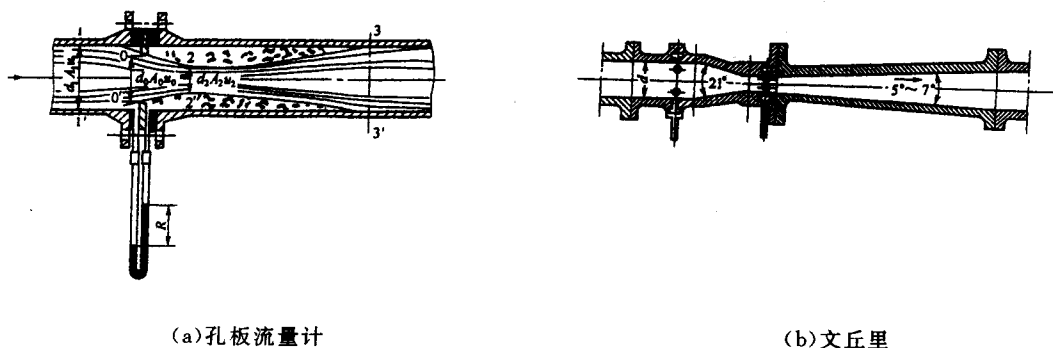
1. 了解转子流量计、孔板流量计和文丘里流量计的结构原理与应用。
2. 熟练掌握转子、孔板和文丘里流量计的标定方法——称重法。
3. 通过节流式流量计孔流系数的测定,得出对应的流量计算公式与曲线。

## 二、基本原理

工厂生产的流量计大都是按标准规范生产的,出厂时一般都在标准状况下(101.325kPa, 20 $^{\circ}\text{C}$ )以水或空气为介质进行标定,给出流量曲线或按规定的流量计算公式给出指定的流量系数,或将流量读数直接刻在显示仪表上。然而在使用时,所处温度、压强及被测介质的性质与标定状况多数并不相同,因此为了准确测量,应在现场进行流量计的标定或校正。对已校正过的流量计,在长时间使用磨损较大时也需要再次校正。对于自制的非标准流量计,则必须进行校正,以确定其流量。流量计的校正有量体法、称重法和基准流量计法。

本实验采用的称重法是通过测量一定时间间隔内排出的流体质量来实现流量计的标定或校正的方法。

孔板流量计和文丘里流量计是应用最广的节流式流量计,其结构如图 1-2 所示。



(a)孔板流量计

(b)文丘里

图 1-2 节流式流量计结构

以孔板流量计为例,若用  $\Delta P_f$  表示节流前后两截面之间的压差,根据两截面之间的柏努利方程,可知:

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2}$$

若流量计水平安装则有

$$\sqrt{u_2^2 - u_1^2} = \sqrt{\frac{2\Delta P_f}{\rho}} \quad (1-7)$$

以孔口速度  $u_0$  代替上式中的  $u_2$ ,对不可压缩流体应用质量守恒式  $u_1 A_1 = u_0 A_0$  代入,得

$$u_0 = \frac{C}{\sqrt{1-m^2}} \sqrt{\frac{2\Delta P_f}{\rho}} = C_0 \sqrt{\frac{2\Delta P_f}{\rho}} \quad (1-8)$$

式中  $u_0$ ——孔口流速, m/s;

$\Delta P_f$ ——节流前后两截面之间的压差, Pa;

$\rho$ ——流体密度, kg/m<sup>3</sup>;

$C_0$ ——孔板的流量系数 ( $C_0 = \frac{C}{\sqrt{1-m^2}}$ );

$m$ ——两截面面积比 ( $m = \frac{A_0}{A_1}$ )。

故所求孔板流量计流量的计算公式为

$$q_s = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2\Delta P_f}{\rho}} \quad (1-9)$$

对文丘里流量计进行流量计算时,只需用其流量系数  $C_v$  代替  $C_0$  即可。

### 三、实验装置及流程

本实验装置由水循环系统、被校流量计测量系统、称重系统与调节系统四部分组成,实验装置如图 1-3 所示。

### 四、实验方法

1. 向水槽中加水至没过隔板后,接通电源并开启水泵,依次打开阀 4, 10, 2 排气并观察