

国家级特色专业建设点建设教材

化学工程与工艺专业实验

*Experiment of Chemical
Engineering and Technology*

许前会 主编



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

国家级特色专业建设点建设教材

化学工程与工艺专业实验

主 编 许前会
副主编 赵跃强 武宝萍
主 审 史继斌

东南大学出版社
· 南京 ·

内 容 提 要

本教材主要内容包括化工专业实验基础知识、化学工程实验、精细合成实验、化工工艺实验、化工过程计算机模拟实验、化工过程控制实验,共计6章。教材中列出实验实例共31个,内容涵盖化工热力学、化学反应工程、化工分离工程、化工过程模拟、化工仪表、化工工艺学、精细化工工艺学等化学工程与工艺专业的主干课程。

教材强调对学生化工专业综合素质的基本训练,注重工程观念的应用与实践,强调对学习者的开发和创新能力的培养。教材实用性较强,可作为上述化工专业课程的课内实验教材,也可以作为化学工程与工艺专业综合实验教材,还可供化工类科研和实验工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

化学工程与工艺专业实验 /许前会主编. —南京:
东南大学出版社,2011.6
ISBN 978-7-5641-2741-1

I. ①化… II. ①许… III. ①化学工程—化学实验
IV. ①TQ016

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第078998号

化学工程与工艺专业实验

出版发行 东南大学出版社
责任编辑 陈跃 E-mail:chenyue58@sohu.com
出版人 江建中
社 址 南京市四牌楼2号
邮 编 210096

经 销 全国各地新华书店
印 刷 南京雄洲印刷有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 9.75
字 数 250千字
版 次 2011年6月第1版 2011年6月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-2741-1
定 价 20.00元

(凡因印装质量问题,请与我社读者服务部联系。电话:025-83792328)

前 言

21 世纪我国化工领域对化工专业人才需求的特点是厚基础、宽方向,注重学科的交叉与融合。为实现人才培养目标,化学工程与工艺专业的教学内容正变得越来越宽泛,不仅包含传统的化学工程、精细化工、化工工艺方向,同时,各高校还增加了化工过程控制和计算机模拟等课程,以适应日新月异的现代化工的技术发展。

“化学工程与工艺专业实验”作为化工专业的一个重要的实践性教学环节,其教学目的在于:通过实验使学生能更加深入地理解所学过的化工专业理论知识,熟悉和正确使用化工专业实验室中常用的仪器和设备;掌握化工专业实验技能、实验数据的处理方法以及工程实验的设计和组组织方法;熟悉实验室安全技术;初步掌握化工新产品的设计和开发方法。

教材在编写过程中遵循以下原则:

(1) 系统性。本教材不仅含有传统化工专业的化学工程、化工工艺、精细化工方向的实验,同时包含了化工仪表实验,并首次添加了化工计算机模拟实验。教材系统地涵盖了本科化学工程与工艺专业各主干专业课程实验,避免了以往各课程实验各自为政、零星分散或交叉重复的情况,便于学生系统掌握相关化工实验知识。

(2) 实用性。本教材作为实验指导书用,对实验数据的处理提出了更加具体细致的要求,并设计了大量实用的数据记录与处理表格,便于学生使用。由于教材涵盖化工专业除化工原理以外的大部分专业课程实验,学生可以跨多学期使用此教材,基本做到“一册在手,实验无忧”。

(3) 创新性。本教材首次将化工过程计算机模拟实验编入内容,其中配有大量编者原创的 Visual Basic 语言编制的计算程序,便于教师指导及学生实验时参考。

教材可用作高等学校的化学工程与工艺专业学生实验教材,也可供从事化工相关的技术人员作参考。

教材的“第一章化工专业实验基础知识”和“第四章化工工艺实验”由许前会编写,“第二章化学工程实验”由许前会、武宝萍、张秋荣编写,“第三章精细合成实验”由张珍明、朱平华、张所信编写,“第六章化工过程控制实验”由王寿武编写;特别感谢赵跃强副教授编写了“化工过程计算机模拟实验”章节内容,并提供了大量原创的 Visual Basic 计算程序。教材由许前会老师统稿,史继斌教授负责审稿。本书在编写过程中,得到卢星河教授的指导和帮助,在此一并感谢。

由于作者能力所限,书中不足之处在所难免,恳请读者提出宝贵意见,以使本书更加完善。

编 者

2011年5月

目 录

第一章 化工专业实验基础知识	1
1.1 实验设计	1
1.2 实验数据的处理	3
1.3 化工过程参数的测量方法	8
第二章 化学工程实验	15
实验一 二元系统气液平衡数据的测定	15
实验二 三元液液平衡数据的测定	19
实验三 液-液传质系数的测定	23
实验四 恒沸精馏制备无水乙醇	28
实验五 鼓泡反应器中气泡比表面及气含率的测定	32
实验六 连续流动反应器中的返混测定	36
实验七 甲苯邻氢歧化制苯和二甲苯	41
实验八 组合膜分离实验	45
第三章 精细合成实验	49
实验一 相转移催化法合成对硝基苯甲醚	49
实验二 食品防腐剂尼泊金乙酯的合成	51
实验三 扁桃酸的制备	53
实验四 十二烷基二甲基甜菜碱型表面活性剂的合成	55
实验五 洗发香波的配制	58
第四章 化工工艺实验	61
实验一 反应精馏法制备醋酸乙酯	61
实验二 酯交换法制备碳酸二甲酯	65
实验三 超临界流体萃取姜油	69
实验四 沸石催化剂的制备	72
第五章 化工过程计算机模拟实验	75
实验一 VB化工物性数据库构建	75
实验二 理想体系泡点温度和平衡气相组成预测	80
实验三 理想体系露点温度和平衡液相组成预测	87
实验四 理想体系等温闪蒸计算	94

实验五	液液萃取分层性能预测	102
实验六	串联-平行反应动态模拟	110
第六章	化工过程控制实验	122
实验一	一阶单容上水箱对象特性测定	122
实验二	热电偶温度计的使用	126
实验三	电子电位差计的校验	128
实验四	调节器控制规律测定	130
实验五	PI控制过程图谱测定	134
实验六	单回路控制系统实验	136
实验七	上水箱下水箱液位串级控制实验	139
实验八	前馈控制系统实验	141
附录	144

第一章 化工专业实验基础知识

1.1 实验设计

实验设计是根据已确定的实验内容,拟定一个具体的实验安排表,以指导实验进程的过程。实验设计方法主要讨论如何合理地安排实验以及实验所得的数据如何分析等。常用的实验设计方法有:正交实验设计法、均匀实验设计法、单纯形优化法、双水平单纯形优化法、回归正交设计法、序贯实验设计法等。可供选择的实验方法很多,各种实验设计方法都有其一定的特点。实验设计的核心内容就是安排和组织实验,用最少的实验获取最有价值的实验结果。

实验设计方法常用的术语定义说明如下:

(1) **实验指标** 指实验研究过程的因变量,常为实验结果特征的量(如收率、纯度、产量等)。

(2) **因素(子)** 指实验研究过程的自变量,通常是指影响实验结果的因素,如温度、压力、原料配比、反应时间等。

(3) **水平** 指实验中因素所处的具体状态,又称为等级。如某反应过程温度取 50 °C、70 °C、90 °C 三个水平,表示为 T_1 、 T_2 、 T_3 。

下面简要介绍化工实验中常用的两种设计方法。

1.1.1 析因设计法

析因法又称网格法,本法的特点是以各因子各水平的全面搭配来组织实验,逐一考察各因子的影响规律。通常采用的实验方法是单因子变更法,即每次实验只改变一个因子的水平,其他因子保持不变,以考察该因子的影响。如在产品制备的工艺实验中,常采取固定原料浓度、配比、搅拌强度或进料速度,考察温度的影响;或固定温度等其他条件,考察浓度影响的实验方法。据此,要完成所有因子的考察,实验次数 n 、因子数 N 和因子水平数 K 之间的关系为: $n=K^N$ 。一个 4 因子 3 水平的实验,实验次数为 $3^4=81$ 。可见,对多因子多水平的系统,本法的实验工作量非常大,在对多因子多水平的系统进行工艺条件寻优或动力学测试的实验中应谨慎使用。

1.1.2 正交设计法

用正交表安排多因素试验的方法,称为正交试验设计法。其特点为:① 完成试验要求所需的实验次数少。② 数据点的分布很均匀。③ 可用相应的极差分析方法、方差分析方法、回归分析方法等对试验结果进行分析,引出许多有价值的结论。

正交实验设计所采取的方法是制定一系列规格化的实验安排表供实验者选用,这种表称为正交表。正交表可用 $L_n(K^N)$ 表示,其中, L 为正交表; n 为实验次数(实验号); K 为因

子的水平数; N 为实验因子数(列号)。

常用的正交表有 $L_8(2^7)$ 、 $L_9(3^4)$ 等。

$L_8(2^7)$ 表头见表 1-1, 表示此表最多可容纳 7 个因子, 每个因子有 2 个水平, 实验次数为 8。

表 1-1 正交表 $L_8(2^7)$

列号 实验号	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

$L_9(3^4)$ 表头如表 1-2 所示, 表示此表最多可容纳 4 个因子, 每个因子有 3 个水平, 实验次数为 9。

表 1-2 正交表 $L_9(3^4)$

列号 实验号	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

正交实验结果分析方法通常采用极差分析方法进行分析和比较。因此, 我们通过对极差法分析正交实验结果的分析, 可得出如下几个结果:

(1) 在实验范围内, 各列对实验指标的影响从大到小的排队。某列的极差最大, 表示该列的数值在实验范围内变化时, 使实验指标数值的变化最大。所以各列对实验指标的影响从大到小的排队, 就是各列极差的数值从大到小的排队。

(2) 实验指标随各因素的变化趋势。为了能更直观地看到变化趋势, 常将计算结果绘制成图。

(3) 使实验指标最好的适宜操作条件(适宜的因素水平搭配)。

(4) 可对所得结论和进一步的研究方向进行讨论。

【例 1-1】 某反应过程影响因素有 4 个,每因素有 3 个水平,实验指标为产物收率 y ,采用 $L_9(3^4)$ 正交表设计实验,结果见表 1-3,分析实验的优化反应条件,并指出主要影响因素。

表 1-3 $L_9(3^4)$ 正交实验计算

实验号	A	B	C	D	收率
1	1	1	1	1	88.6
2	1	2	2	2	95.3
3	1	3	3	3	89.1
4	2	1	2	3	92.8
5	2	2	3	1	94.6
6	2	3	1	2	89.0
7	3	1	3	2	85.2
8	3	2	1	3	92.1
9	3	3	2	1	91.3
I_j	91	88.8	89.9	91.5	
II_j	92.1	94.0	93.1	89.8	
III_j	89.5	89.8	92.6	91.3	
极差	2.6	5.2	3.2	1.7	

解:

(1) 计算各列相同水平收率的和均值 I_j ,以 C 列为例:

$$I_1 = (y_1 + y_6 + y_8) / 3 = (88.8 + 89.0 + 92.1) / 3 = 89.9$$

$$I_2 = (y_2 + y_4 + y_9) / 3 = (95.3 + 92.8 + 91.3) / 3 = 93.1$$

$$I_3 = (y_3 + y_5 + y_7) / 3 = (89.1 + 94.6 + 85.2) / 3 = 92.6$$

每列中和均值最大的水平为该因素的优化值,本例分析得最佳合成条件为: $A_2B_2C_2D_1$ 。

(2) 计算极差

极差是每列和均值的最大值和最小值之差,如对 C 列:极差 = $I_2 - I_1 = 93.1 - 89.9 = 3.2$,比较各列的极差,极差值越大表示该因素对实验结果影响越强烈,本例各因素影响顺序为 $B > C > A > D$ 。

1.2 实验数据的处理

实验获得的大量数据必须经过正确地分析、处理和关联,才能清楚地看出各变量间的定量关系,从中获得有价值的信息与规律。实验数据的处理是一项技巧性很强的工作,处理方法得当,会使实验结果清晰而准确;否则,将得出模糊不清甚至错误的结论。实验数据处理常用的方法有三种:列表法、图示法和回归公式法,叙述如下。

1.2.1 实验结果的列表

列表法是将实验的原始数据、运算数据和最终结果直接列举在各类数据表中,以展示实

验成果的一种数据处理方法。根据记录的内容不同,数据表主要分为两种:原始数据记录表和实验结果表。其中,原始数据记录表是在实验前预先制定的,记录的内容是未经任何运算处理的原始数据,如表 1-4 所示。实验结果表记录了经过运算和整理得出的主要实验结果,该表的制定应简明扼要,直接反映实验主要实验指标与操作参数之间的关系,如表 1-5 所示。

表 1-4 水-醋酸-醋酸乙烯酯液液平衡实验数据记录表

序号	醋酸(g)	水(g)	醋酸乙烯酯(g)	上层滴定 NaOH 体积(mL)	下层滴定 NaOH 体积(mL)
1	5.002	15.101	10.002	15.05	17.60
2	4.063	16.087	10.004	12.60	13.00
3	3.105	18.106	8.802	8.85	12.65
4	3.404	17.103	9.509	3.00	16.50
上层样品体积 = 1.00 mL				下层样品体积 = 1.00 mL	

表 1-5 水-醋酸-醋酸乙烯酯液液平衡实验数据处理结果表

上层醋酸 (mol · mL ⁻¹)	下层醋酸 (mol · mL ⁻¹)	上层醋酸 (wt%)	上层水 (wt%)	上层醋酸乙 烯酯(wt%)	下层醋酸 (wt%)	下层水 (wt%)	下层醋酸· 乙烯酯(wt%)	分配 系数 K
1.505	1.760	0.099 2	0.035 0	0.865 8	0.105 6	0.856 4	0.038 1	0.94
1.260	1.301	0.083 1	0.030 1	0.886 9	0.078 0	0.886 0	0.036 0	1.07
0.885	1.265	0.058 4	0.025 1	0.916 6	0.075 9	0.890 1	0.034 1	0.77
0.300	1.651	0.019 8	0.140 2	0.840 2	0.099 1	0.854 1	0.047 2	0.20

1.2.2 实验数据的图示

图示法是以曲线的形式简单明了地表达实验结果的常用方法,图示法能直观地显示变量间存在的极值点、转折点、周期性及变化趋势。如图 1-1 所示为三釜串联物料出口浓度随时间变化关系曲线。在数学模型不明确或解析计算有困难的情况下,图示求解是数据处理的有效手段。

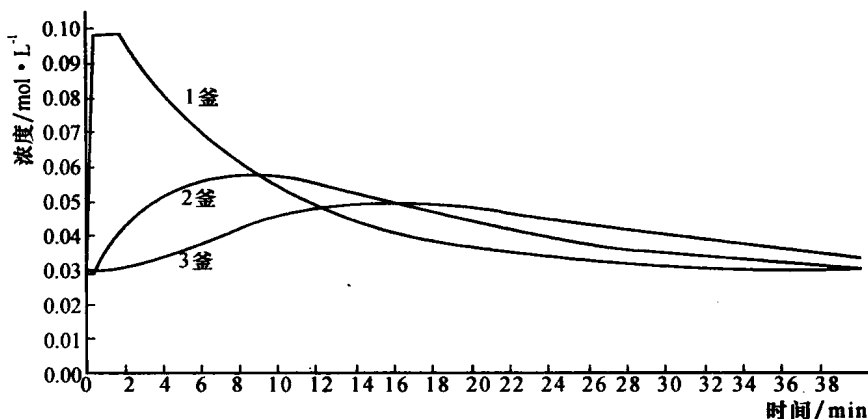


图 1-1 三釜串联出口浓度与时间关系

图示法的关键是坐标的合理选择,包括坐标类型与坐标刻度的确定。坐标选择不当,往往会扭曲和掩盖曲线的本来面目,导致错误的结论。

坐标类型选择的一般原则是尽可能使函数的图形线性化。线性函数形式 $y=a+bx$ 选用直角坐标;指数函数形式 $y=a^{bx}$ 选用半对数坐标;幂函数形式 $y=ax^b$ 选用对数坐标。

1.2.3 实验结果的模型化

实验结果的模型化就是采用数学手段,将离散的实验数据回归成某一特定的函数形式,用以表达变量之间的相互关系,这种数据处理方法又称为回归分析法。

在化工过程开发的实验研究中,涉及的变量较多,这些变量处于同一系统中,既相互联系又相互制约。但是,由于受到各种无法控制的实验因素(如随机误差)的影响,它们之间的关系不能像物理定律那样用确切的数学关系式来表达,只能从统计学的角度来寻求其规律。变量间的这种关系称为相关关系。

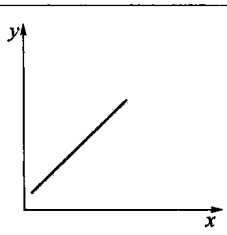
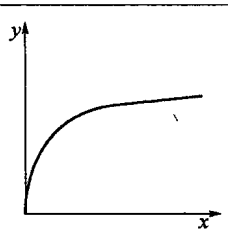
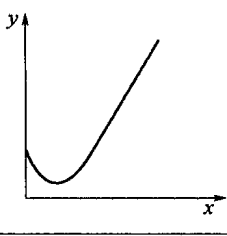
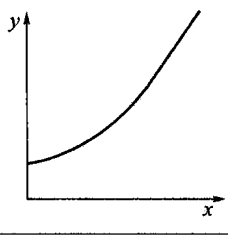
回归分析是研究变量间相关关系的一种数学方法,是数理统计学的一个重要分支。用回归分析法处理实验数据首先要选择和确定回归方程的形式(即数学模型),然后用实验数据确定回归方程中模型参数,最后检验回归方程的等效性。

1) 回归方程的确定

回归方程形式的选择和确定有三种方法:

- (1) 根据理论知识、实践经验或前人的相似工作,选定回归方程的形式。
- (2) 先将实验数据标绘成曲线,观察其接近于哪一种常用的函数的图形,选择方程的形式。图 1-2 列出了几种常用函数的图形。
- (3) 先根据理论和经验确定几种可能的方程形式,然后用实验数据分别拟合,并运用概率论,信息论的原理模型进行筛选,以确定最佳模型。

表 1-6 常见函数图形

函数形式	图 形	函数形式	图 形
$y=a+bx$		$y=a+bx^n$ ($0 < n < 1$)	
$y=a+bx+cx^2$		$y=a+bx^n$ ($n > 1$)	

(续表)

函数形式	图形	函数形式	图形
$y = a + b \lg x$ $(x > 0)$		$y = a + be^{nx}$ $(n < 0)$	
$y = a + be^{nx}$ $(n > 0)$		$y = \frac{1}{a + be^{-x}}$	
$y = \frac{x}{ax + b}$ $(b < 0)$		$y = \frac{x}{ax + b}$ $(b > 0)$	

2) 模型参数的估计

当回归方程的形式(即数学模型)确定后,要使模型能够真实的表达实验的结果,必须用实验数据对方程进行拟合,进而确定方程中的模型参数,如对线性方程 $y = a + bx$,其待估参数为 a 和 b 。

由于实验中各种随机误差的存在,实验响应值 y_i 与数学模型的计算值 \hat{y} 不可能完全吻合。但可以通过调整模型参数,使模型计算值尽可能逼近实验数据,使两者的残差 $(y_i - \hat{y})$ 趋于最小,从而达到最佳的拟合状态。

据此思路,同时考虑到不同实验点的正负残差有可能相互抵消,影响拟合的精度,拟合过程采用最小二乘法进行参数估值,即选择残差平方和最小为参数估值的目标函数,其表达式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 \rightarrow \min \quad (1-1)$$

最小二乘法可用于线性或非线性、单参数或多参数数学模型的参数估计,其求解的一般步骤为:

(1) 将选定的回归方程线性化。对复杂的非线性函数,应尽可能采取变量转换或分段线性化的方法,使之转化为线性函数。

(2) 将线性化的回归方程代入目标函数 Q , 然后对目标函数求极值,即将目标函数分别对待估参数求偏导数,并令导数为零。得到一组与待估参数个数相等的方程,称为正规

方程。

(3) 由正规方程组联立求解出待估参数。

如用最小二乘法对二参数一元线性函数 $y=a+bx$ 进行参数估值,其目标函数为:

$$Q = \sum (y_i - \hat{y})^2 = \sum [y_i - (a + bx_i)]^2 \quad (1-2)$$

式中, \hat{y} ——回归方程计算值; a, b ——模型参数。

对目标函数求极值可得正规方程为:

$$na + \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)b = \sum_{i=1}^n y_i \quad (1-3)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)b = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (1-4)$$

令:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-5)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (1-6)$$

由正规方程可解出模型参数为:

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (1-7)$$

$$b = \frac{\sum x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum x_i^2 - n\bar{x}^2} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-8)$$

【例 1-2】 在某合成反应实验中,测得的不同时间 t 与产物浓度 C 的关系数据见下表,根据数据拟合浓度与时间的关系曲线。

序号	1	2	3	4	5
t/h	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
$C/mol \cdot L^{-1}$	5.10	5.79	6.53	7.45	8.46

解:作出 $C-t$ 关系曲线,如图 1-2 所示。

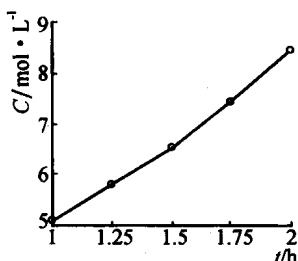


图1-2 浓度-时间关系曲线

从曲线形态看 $C-t$ 关系符合 $C=ae^{bt}$ 函数形式,用最小二乘法拟合此曲线,求取参数 a, b 。

$C=ae^{bt}$ 两边取对数得 $\ln C=\ln a+bt$, 令 $y=\ln C, A=\ln a$, 则 $y=A+bt$, 可以用线性拟合。先将 (t_i, C_i) 数据转化为 (t_i, y_i) 数据, 结果见下表。

序号	1	2	3	4	5
t_i (h)	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
y_i	1.629	1.756	1.876	2.008	2.135

$$\bar{t} = \frac{\sum t_i}{n} = \frac{1}{5} \times (1 + 1.25 + 1.5 + 1.75 + 2) = 1.5$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} = \frac{1}{5} \times (1.629 + 1.756 + 1.876 + 2.008 + 2.135) = 1.8808$$

$$\sum t_i^2 = 11.875, \quad \sum t_i y_i = 14.422$$

$$b = \frac{\sum t_i y_i - n \bar{t} \bar{y}}{\sum t_i^2 - n \bar{t}^2} = \frac{(14.422 - 5 \times 1.5 \times 1.8808)}{(11.875 - 5 \times 1.5^2)} = 0.5056$$

$$A = \bar{y} - b \bar{t} = 1.8808 - 0.5056 \times 1.5 = 1.1224, \text{ 则 } a = e^A = 3.071$$

最后得最小二乘拟合曲线为 $C=3.071e^{0.5056t}$ 。

1.3 化工过程参数的测量方法

1.3.1 温度的测量

在化工生产中, 温度的检测与控制是保证产品质量、降低生产成本、确保安全生产的重要手段。温度不能直接进行测量, 只能借助于冷热不同的物体之间的热交换, 或者物体的某些物理性质随温度的不同而变化来进行间接测量。温度检测的基本原理不同, 所采用的检测仪器也不同。

(1) 利用热膨胀原理测温 常用的有液体膨胀式温度计(如玻璃温度计)和固体膨胀式温度计(如双金属温度计);

(2) 利用热电效应原理测温 主要有热电偶温度计;

(3) 利用热阻效应原理测温 主要有铜和铂热电阻温度计;

(4) 利用压力随温度变化的原理测温 主要有温包式温度计;

(5) 利用热辐射原理测温 主要有红外温度计。

这里介绍化工中最常用的两种温度计。

1) 热电偶温度计

热电偶温度计是基于热电效应原理测量温度的。测温系统的组成如图 1-3 所示, 它主要包括三个部分: 热电偶是系统中的测温元件; 显示仪表用来检测热电偶产生的热电势信号, 可以采用动圈式仪表, 也可以用电位差计; 导线用来连接热电偶和显示仪表。

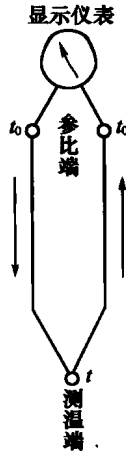


图 1-3 热电偶测温回路示意图

闭合回路中的总热电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 可表示为：

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0) \quad (1-9)$$

或

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t) + E_{BA}(t_0) \quad (1-10)$$

热电偶一般由热电极、绝缘子、保护套管和接线盒等部分组成，但外形可能差别很大。两根热电极上分别套有绝缘子（绝缘瓷圈或绝缘瓷套管），以防短路。为了保护热电极免受化学和机械损伤，通常将热电极以及绝缘子装入不锈钢或其他材质的保护套管内。参比端由接线盒内的端子与外部导线连接。普通热电偶的结构如图 1-4 所示。

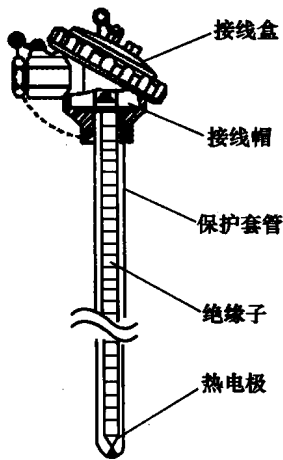


图 1-4 热电偶结构示意图

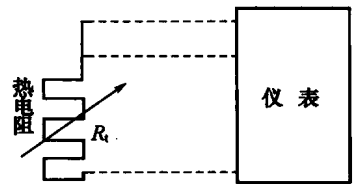


图 1-5 热电阻温度计示意图

工业热电偶已经实现了标准化生产。常用热电偶有铂铑 30-铂铑 6、铂铑 10-铂、镍铬-镍硅、镍铬-铜镍、铁-铜镍和铜-铜镍 6 种。

2) 热电阻温度计

热电阻温度计是基于导体或半导体材料的电阻值随温度而变化的性质，通过测量其电阻值及改变值，间接测量温度。

热电阻温度计由热电阻、显示仪表及连接导线三部分组成，如图 1-5 所示。

热电阻温度计一般用来测量 500 °C 以下的中、低温温度,在这样的温度范围内,比热电偶温度计具有更高的灵敏度和测量精度,而且无冷端补偿问题;电阻信号便于远传,较电势信号易于处理和抗干扰。但其缺点是体积较大、热惯性大,不能测量某一点的温度;使用时需外加电源供电,本身发热还会影响被测温度场,在有爆炸危险的气体中使用时受到限制;连接导线的电阻易受环境温度的影响而产生测量误差,必须采用三线制接法。

热电阻温度计适用于测量 -200~+500 °C 范围内液体、气体、蒸气及固体表面的温度。它与热电偶温度计一样,也具有远传、自动记录和实现多点测量等优点。另外热电阻的输出信号大,测量比较准确。

工业常用热电阻有铂电阻和铜电阻。

(1) 铂电阻

铂电阻是用纯铂丝绕制而成,其使用温度范围为 -200~+850 °C。我国规定的工业用铂电阻分度号有 Pt₁₀ 和 Pt₁₀₀ 两种,其 0 °C 时的电阻值分别为 10 Ω 和 100 Ω。Pt₁₀ 铂电阻的电阻丝较粗,主要用于 600 °C 以上的温度测量。

在 0~850 °C 的温度范围内,铂电阻与温度的关系为:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (1-11)$$

式中, R_t —— 温度为 t °C 时的电阻值;

R_0 —— 温度为 0 °C 时的电阻值;

A, B —— 常数, $A = 3.950 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $B = -5.850 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ 。

(2) 铜电阻

铜电阻一般用于 -50~+150 °C 范围内的温度测量。在 -50~+150 °C 的范围内,铜电阻与温度的关系是线性的,可以表示为:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (1-12)$$

式中, α —— 电阻温度系数, $\alpha_{\text{Cu}} = 4.25 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

目前常用的铜电阻有两种: Cu₅₀ ($R_0 = 50 \text{ } \Omega$) 和 Cu₁₀₀ ($R_0 = 100 \text{ } \Omega$)。

1.3.2 压力的测量

测量压力和真空度的仪表很多,按照其转换原理的不同,可分为以下四类。

(1) 液柱式压力(差)计

液柱式压力计是基于流体静力学原理设计的,其结构比较简单,精度较高,既可用于测量流体的压强,也可用于测量流体的压差。测量原理是将被测压力转换成液柱高度差进行测量。几种常用的液柱式压力计如图 1-6 所示。

液柱式压力计常用的指示液为汞和水。当被测压差很小,且流体为水时,还可用氯苯 ($\rho = 1106 \text{ kg/m}^3$, 20 °C) 和四氯化碳 ($\rho = 1594 \text{ kg/m}^3$, 20 °C) 作指示液。

若液柱压力计一端与设备或管道连接,另一端与大气相通,这时读数所反映的是管道中某截面处流体的绝对压强与大气压之差,即为表压强。

(2) 弹性式压力计

利用各种形式的弹性元件,在受到压力作用后产生弹性变形,根据弹性元件变形后产生的位移大小来测量压力。由于测量范围广、结构简单、价格便宜、维修方便,并适宜在现场使用,所以这类仪表在压力测量中应用广泛。可作为弹性式压力表的弹性元件很多,如弹簧