



高等学校试用教材

抗生素生产设备

华东化工学院

俞俊棠 主编

化学工业出版社

82.916
408
C.2

高等学校试用教材

抗生素生产设备

华东化工学院 俞俊棠 主编

化学工业出版社

(京)新登字039号

内 容 提 要

本书系高等院校抗生素制造和微生物制药专业的试用教材，也可供生化工程和发酵工程等专业选择使用，对从事抗生素生产及其它发酵工业生产的技术人员也有参考价值。

本书内容着重介绍抗生素生产中有关单元操作的原理及设备，并着眼于化工工艺的计算，书中附有较多具有实际意义的例题，使学生通过本课程的学习能基本掌握抗生素生产中关键设备的工艺设计。为照顾教材的系统性和完整性，本书对流体流动、热的传递等内容也进行了必要的概述。

高等学校试用教材

抗生素生产设备

华东化工学院 俞俊棠 主编

化学工业出版社出版

(北京朝阳区惠新里3号)

北京朝阳区东华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本787×1092¹/₁₆印张 21³/₄插页 1 字数547千字

1982年10月第1版 1994年10月北京第6次印刷

印 数 13,041—15,090

ISBN 7-5025-0423-0/G·79 (课)

定 价12.40元

前 言

本教材是根据1977年10月在成都召开的化学制药及抗生素制造专业教材会议的决定编写的，主要供高等院校抗生素制造专业、微生物制药专业使用，也可供生化工程专业和发酵工程专业选择使用。本书还可供从事抗生素及其它发酵工业生产的技术人员参考。

本书内容着重介绍抗生素生产中有关单元操作的原理及设备，并着眼于化工工艺计算，书中附有大量具有实际意义的例题，使学生通过本课程的学习能基本掌握抗生素生产中关键设备的工艺设计。全书共分十二章，其中第一、二章介绍抗生素生产中有关流体流动、热量传递的基础理论，第十二章介绍抗生素生产中特殊仪表和自动控制装置，其它诸章基本上都按生产工序的先后编写。

我们在编写过程中注意了理论与实际的结合，适当介绍了一些有关的新型设备。本教材内容主要取材于国内外有关书刊，同时也注意到国内抗生素生产的实际经验，某些内容系我们以往实践的体会。

本书第一、二章由张庆霖执笔，第三、四、五、八、十一、十二等六章由俞俊棠执笔，第六、七、九、十等四章是在屠天强编写的初稿基础上由俞俊棠补充的，全书由俞俊棠负责主编，沈自法整理全稿，褚孟秋描绘图表。参加初稿审阅的有无锡轻工业学院王鸿祺、华南工学院高孔荣、沈阳药学院张淑修、上海医药工业研究院朱守一、上海医药工业设计院肖群英、华北制药厂程连芳、上海第三制药厂黄福华等同志，由朱守一和程连芳两同志担任主审，审阅全稿。

由于水平所限，本书可能会有不少缺点以至错误，希望读者提出宝贵意见，以便再版时改正。

编 者

一九八〇年七月

目 录

绪论	1
第一章 流体流动及流体输送机械	7
第一节 流体的基本性质	7
第二节 流体流动中的物料与能量衡算	15
第三节 流体阻力的计算	20
第四节 流量测量仪表	24
第五节 液体输送机械	29
第六节 气体输送机械	35
第二章 热的传递和传热设备	41
第一节 热传导	41
第二节 对流传热	44
第三节 热辐射	47
第四节 传热基本方程式	48
第五节 换热设备	52
第六节 传热过程的强化	55
第三章 培养基灭菌设备	61
第一节 分批灭菌过程中的设备及计算	61
第二节 连续灭菌过程中的设备及计算	70
第四章 空气除菌设备	78
第一节 压缩空气预处理的原理及设备	78
第二节 空气的除菌设备	93
第五章 发酵设备	106
第一节 发酵罐的结构	106
第二节 搅拌功率的计算	120
第三节 通气及搅拌过程中的质量传递	127
第四节 发酵罐的放大	138
第五节 种子培养设备及培养室和无菌室的要求	145
第六章 液-固分离设备	151
第一节 液-固分离设备的介绍	151
第二节 液-固分离的计算	162
第三节 超滤和反渗透的简介	170
第七章 溶媒萃取设备	172
第一节 溶媒萃取设备	172
第二节 液-液萃取过程的计算	179
第三节 液-液萃取设备的计算	181

42972

第八章 离子交换设备	194
第一节 离子交换设备的分类和结构.....	194
第二节 离子交换设备的计算.....	197
第三节 电渗析设备.....	203
第九章 蒸发和结晶设备	206
第一节 蒸发设备的结构.....	206
第二节 蒸发设备的计算.....	211
第三节 结晶设备的计算.....	216
第十章 成品干燥设备	222
第一节 干燥过程的基本计算方法.....	223
第二节 气流干燥器.....	228
第三节 沸腾干燥器.....	246
第四节 喷雾干燥器.....	260
第五节 冷冻干燥.....	274
第六节 其它有关干燥方法.....	282
第十一章 溶媒回收设备	291
第一节 抗生素生产中常用溶媒的汽-液平衡关系.....	291
第二节 溶媒回收的基本方法及其计算.....	294
第三节 抗生素生产中溶媒回收的具体方案及其计算.....	312
第四节 非均相共沸物的汽-液平衡数据计算.....	315
第十二章 抗生素生产的仪表及自动控制	319
第一节 抗生素生产中的特殊测量仪表及仪器.....	319
第二节 抗生素生产的自动控制.....	329
第三节 电子计算机在发酵过程中的应用.....	334

绪 论

抗生素是人类战胜疾病，特别是由各种病原菌引起的传染病的有力武器，它在农业和畜牧业方面也广泛应用。因此抗生素生产对保障人民健康和发展现代化农牧业具有重要意义。

目前大多数抗生素是利用某些微生物进行纯种发酵，并将其具有拮抗作用的代谢产物加以提取和精制而制得的。因此抗生素生产可以分为发酵和提取两部分，前者主要是微生物的扩大培养和使之分泌抗生素的过程，它涉及培养基灭菌、空气除菌、发酵过程中的气液接触和质量传递等生化工程的单元操作和特殊设备；后者则包括液固分离、液液萃取、液液分离、离子交换、固体干燥等一般化工单元操作及设备。本书以讲述与生化工程有关的单元操作及特殊设备为主，但也根据抗生素的特殊要求对一般化工单元操作及设备加以必要的论述，其中不少内容是在化工原理课程的基础上进一步深化和充实，使之能对抗生素生产的主要设备进行工艺设计。

为了使读者能熟练掌握化工计算中的一些基本方法，下面将分别对化工计算中的一些基本概念和单位换算方法进行概括的复习。

一、化工计算中的一些基本概念

在研究抗生素生产过程及设备时，必然会涉及生产过程及设备中物料及能量的衡算，并以此为基础进一步确定设备的数量、主要尺寸和结构型式。

1. 质量守恒定律及物料衡算

物料衡算是质量守恒定律的具体应用，其内容为：凡引入某一系统或某一设备的物料总重量必须等于离开此系统或设备的物料总重量，而在实际制造过程中，物料不可避免地会有损失，其损失量即为输入量和输出量的差额。

$$\Sigma G_1 = \Sigma G_2 + \Sigma G_3$$

式中 ΣG_1 ——输入物料总量；

ΣG_2 ——输出物料总量；

ΣG_3 ——物料的损失总量。

物料衡算对于化工生产过程的计算和设备的设计具有重要意义，它可以反映出生产过程及设备的完善程度，并使之进一步获得改进和提高。

2. 能量守恒定律及能量衡算

能量衡算为能量守恒定律的具体应用。其定义为：凡引入某一系统或某一设备的总能量必须等于此系统或设备输出的总能量。严格的能量衡算应包括与过程操作有关的各种形式的能量，如热能、电能、机械能、化学能、原子能等等。但在很多实际情况中，操作只涉及到热能，或主要为热能，此时能量衡算实际上即为热量衡算，即如下式所示：

$$\Sigma Q_1 = \Sigma Q_2 + \Sigma Q_3$$

式中 ΣQ_1 ——输入的总热量；

ΣQ_2 ——输出的总热量；

ΣQ_3 ——损失的总热量。

热量衡算为检验一个化工过程或设备的能量运用是否完善与正常的方法之一,在进行过程设计时,是否需要补充热量或取出热量也可通过热量衡算确定。

3. 变化速率

研究抗生素过程及设备时,除需进行物料与能量的衡算外,还必须了解过程中物料及能量的变化速率,即过程反应的快慢及其变化的规律,以便更好地发挥设备的生产能力,提高设备效率。

4. 变化规律的总结归纳方法

如上所述,物料与能量的衡算以及其变化速率是研究抗生素生产的重要组成部分,但要了解这些规律,必须对抗生素生产过程进行深入细致的观察分析,要在科研的基础上进行归纳和总结。在总结归纳过程的数量变化规律时,常用的方法有如下三类:数学分析法;经验方法;因次分析法(也称相似方法或半经验法)。在实际情况中,除了极少数比较简单的情況可由数学方法推导出它们的规律式外,由于过程的错综复杂、影响因素众多,大多是借助于上述的半经验方法来解决,也有一些是用经验方法的公式。在使用这些经验公式时,必须注意其适用范围和条件,尤其要注意公式中所用的因次和单位。

二、单位制和因次

在对生产过程进行分析和研究时,必然涉及到与过程有关的各种物理量。反映过程规律的各种方程式,有其多方面的来源,有的来自自然科学,也有的来自工程技术。因而有的采用工程单位制,也有的采用绝对单位制;另有历史原因尚有公制与英制之分。现对有关的单位制和单位换算进行简略介绍。

参与生产过程的物质,皆具有各种物理性质和处于一定的操作状态,且可用不同的物理量表示,如重度、粘度、速度等,在具体量度这些物理量时,就涉及量度的尺度——单位的问题。以速度为例,我们经常遇到下列单位:米/秒,公里/时,英尺/秒,英里/时……,这里既有公制,又有英制,此外即使是用公制(或是英制),由于所采用的单位不同,同一质点的速度数值也是不同的,也即任何一个物理量必须通过数量与单位两者的结合才能完整地表示。然而,一个物理量采用不同的单位表示时,虽然其数值不同,但其性质与绝对量是不变的,如对速度来说,它总是长度与时间的比值; $1\text{米/秒}=3.6\text{公里/时}=3.28\text{英尺/秒}=2.24\text{英里/时}$ 。

1. 因次和因次式

为了方便,常用一些符号来代表各基本物理量,如以 L 表示长度, τ 表示时间, M 代表质量, F 代表重量或力, T 代表温度,这样体积可表示为 L^3 , 加速度可写为 $L\tau^{-2}$, 能量可表示为 FL 或 $ML^2\tau^{-2}$ 。上述 L^3 、 $L\tau^{-2}$ 、 FL 或 $ML^2\tau^{-2}$ 等分别称为体积、加速度和能量的因次式(或称量纲式),而体积对 L 的因次(量纲)为 3, 加速度对 L 及 τ 的因次分别为 1 及 -2, 能量对 F 及 L 的因次均为 1, 对 M 、 L 及 τ 的因次则分别为 1、2 及 -2。其它物理量也可依此类推,用不同的因次式表示。

2. 单位制

各物理量常是相互联系的,因此只需确定少数几个物理量,即可导出其它所有的物理量,前者称为基本量、后者称为导出量。基本量的数目由客观规律所确定。如在力学方面基本量为三个,即时间、长度、质量或力;热学的基本量则为四个,即在力学基本量外,再加上温度。但在力学方面由于三个基本因次的选择不同,而有绝对单位制(物理制)与工程单

位制之分。前者又称厘米-克(质)-秒制(C. G. S制),后者又称米-公斤(力)-秒制(M. K. S制),两者区别在于前者以质量M为基本量,后者以重量(或力)F为基本量。1960年以来国际上逐步采用一种国际单位制,简称国际制,其代号为SI,我国也将逐步推广使用。

3. 国际单位制(SI)的简略介绍

在国际单位制中,七个基本物理量为长度、时间、质量、温度、电流、光度和物质的量,其基本单位及符号表示见表1。

表 1 国际单位制中的基本单位

基本物理量	基 本 单 位	符 号	基本物理量	基 本 单 位	符 号
长 度	米	m	电 流	安[培]	A
质 量	千克(公斤)	kg	光 度	坎[德拉]	cd
时 间	秒	s	物质的量	摩[尔]	mol
温 度	开[尔文]	K			

国际单位制除了上面的七个基本单位外,尚有一些具有专门名称的导出单位,这些导出单位也可以用基本单位来表示见表2。

表 2 国际单位制中的导出单位

物 理 量	国 际 制 单 位				
	名 称	代 号		用其它国际制单位 表示的关系式	用国际制基本单位 表示的关系式
		中 文	国 际		
频率	赫 兹	赫	Hz		s^{-1}
力	牛 顿	牛	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
压强、应力	帕 斯 卡	帕	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
能、功、热量	焦 耳	焦	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率、辐射通量	瓦 特	瓦	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
电量、电荷	库 仑	库	C		$S \cdot A$
电位、电压、电动势	伏 特	伏	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
电容	法 拉	法	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
电阻	欧 姆	欧	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
电导	西 门 子	西	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁通量	韦 伯	韦	Wb	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁感应强度	特 斯 拉	特	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
电感	亨 利	亨	H	Wb/A	$m^2 kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
光通量	流 明	流	lm		$cd \cdot sr^{①}$
光照度	勒 克 斯	勒	lx	lm/m^2	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$
放射性活度	贝可勒尔	贝可	Bq		s^{-1}
吸收剂量	戈 瑞	戈	Gy		$m^2 \cdot s^{-2}$

① sr是立体角,是另外两个国际制辅助单位之一,见表3。

必须特别指出:由于一些历史原因,在使用上述各种单位进行运算时,往往出现混乱和错误,在不少书籍上用公斤和千克来分别表示重量(或力)和质量。有的书上公斤中尚有重量与质量的分别,千克也如此,有的以克(力)与克(质)以表示二者的区别。但有些书籍中未用上述写法以示区别,则给学习者带来一定的困难。总之关于公斤或千克在某本书上究

竟是代表重量还是代表质量，应从上下文的联系与单位的涵义来进行判断，以避免应用上的错误。本书为了照顾使用上的方便，暂用工程单位制，公斤系重量的单位，而质量的单位为公斤·秒²/米。表4所列是常用物理量的换算关系。

表3 国际单位制中的辅助单位

物 理 量	国 际 制 单 位		
	名 称	代 号	
		中 文	国 际
平 面 角	弧 度	弧 度	rad
立 体 角	球 面 度	球 面 度	sr

〔例1〕 某物质比重为1.5，试求用不同单位制表示的重度及密度。

解：工程制： $\gamma = 1.5 \times 1000 = 1500$ 公斤/米³

$$\rho = 1.5 \times 102 = 153 \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4$$

绝对制： $\gamma = 1.5 \times 981 = 1471.5$ 达因/厘米³

$$\rho = 1.5 \times 1 = 1.5 \text{ 克} / \text{厘米}^3$$

国际制： $\gamma = 1.5 \times 9.81 \times 10^3 = 1.4715 \times 10^4$ 牛顿/米³

$$\rho = 1.5 \times 1000 = 1500 \text{ 公斤} / \text{米}^3$$

〔例2〕 从原始文献中查得如下关联式：

$$d_b = 4.15 \left[\frac{\sigma^{0.6}}{(P_g/V)^{0.4} \rho^{0.2}} \right] (H'_g)^{0.5} + 0.09$$

式中 d_b ——在机械搅拌下的气泡平均直径，厘米；

σ ——液体的表面张力，达因/厘米；

P_g/V ——通气情况下每单位液体体积中所获得的功率，达因·厘米/秒·厘米³或尔格/秒·厘米³；

ρ ——液体的密度，克(质)/厘米³；

H'_g ——气液混合物中气体的体积分率。

试将以工程制及国际制表示上式。

解：工程制：

因 1 米 = 100 厘米；

1 公斤/米 = 9810 达因/厘米；

1 千瓦/米³ = $10^{10}/10^6 = 10^4$ 尔格/秒·厘米³；

1 公斤·秒²/米⁴ = 9.81×10^{-3} 克(质)/厘米³。

故

$$d_b \times 100 = 4.15 \left[\frac{(9.81 \times 10^3)^{0.6} \sigma^{0.6}}{(10^4)^{0.4} (P_g/V)^{0.4} (9.81 \times 10^{-3})^{0.2} \rho^{0.2}} \right] (H'_g)^{0.5} + 0.09$$

$$\text{或 } d_b = 0.653 \left[\frac{\sigma^{0.6}}{(P_g/V)^{0.4} \rho^{0.2}} \right] (H'_g)^{0.5} + 9 \times 10^{-4}$$

此处： d_b 以米表示， σ 、 (P_g/V) 及 ρ 的单位分别为公斤/米、千瓦/米³及公斤·秒²/米⁴。此式即第五章中的式5-40。

表 4 常用物理量的换算关系

物 理 量	工 程 单 位 制 (米-公斤(力)-秒制)	国 际 单 位 制 (米-公斤(质)-秒制)	绝 对 单 位 制 (厘米-克(质)-秒制)
质量M	0.102公斤·秒 ² /米 或0.102工程质量单位	1 千克	1000克
重量、力F	1 公斤	9.81千克·米/秒 ² 或9.81牛顿	9.81×10 ⁵ 克·厘米/秒 ² 或9.81×10 ⁻⁵ 达因
密度ρ	102公斤·秒 ² /米 ⁴ 或102工程质量单位/米 ³	1000千克/米 ³	1 克/厘米 ³
重度γ	1000公斤/米 ³	9.81×10 ³ 千克/米 ² ·秒 ² 或9.81×10 ³ 牛顿/米 ³	981克/厘米 ² ·秒 ² 或981达因/厘米 ³
速度w	1 米/秒	1 米/秒	100厘米/秒
加速度a	1 米/秒 ²	1 米/秒 ²	100厘米/秒 ²
压强p	1 公斤/厘米 ² =10 ⁴ 公斤/米 ²	9.81×10 ⁴ 牛顿/米 ² 或9.81×10 ⁴ 帕斯卡	9.81×10 ⁵ 达因/厘米 ²
功、能、热量P	1 公斤·米	9.81牛顿·米 或9.81焦耳	9.81×10 ⁷ 达因/厘米 或9.81×10 ⁷ 尔格
	1 千卡=426.9公斤·米	4.187×10 ³ 焦耳	1000卡 或4.187×10 ¹⁰ 尔格
	1 千瓦·时=3.67×10 ⁶ 公斤·米	3.6×10 ⁶ 焦耳	3.6×10 ¹³ 尔格
功率W	1 公斤·米/秒	9.81焦耳/秒 或9.81瓦	9.81×10 ⁷ 尔格/秒
	1 千瓦=102公斤·米/秒	1000瓦	10 ¹⁰ 尔格/秒
	1 马力=76公斤·米/秒	746瓦	7.46×10 ⁹ 尔格/秒
粘度μ	1.02×10 ⁻² 公斤·秒/米 ²	0.17克/米·秒 或0.17牛顿·秒/米 ² 或0.1帕斯卡·秒	1 泊=1 克/厘米·秒 =1 达因·秒/厘米 ² =100厘泊
运动粘度ν	10 ⁻⁴ 米 ² /秒=0.36米 ² /时	10 ⁻⁴ 米 ² /秒	1 斯托克=1 厘米 ² /秒
表面张力σ	1.02×10 ⁻⁴ 公斤/米	10 ⁻³ 牛顿/米 或10 ⁻³ 千克/秒 ²	1 达因/厘米=1 克/秒 ²
比热c	1 千卡/公斤·℃	4.187焦耳/公斤·°K	1 卡/克·℃
导热系数λ	1 千卡/米·时·℃	1.163焦耳/米·秒·°K 或1.163瓦/米·°K	2.78×10 ⁻³ 卡/厘米·秒·℃
传热系数K	1 千卡/米 ² ·时·℃	1.163瓦/米 ² ·°K	2.78×10 ⁻⁵ 卡/厘米 ² ·秒·℃
扩散系数D	10 ⁻⁴ 米 ² /秒=0.36米 ² /时	10 ⁻⁴ 米 ² /秒	1 厘米 ² /秒
气体常数R	1.987千卡/公斤分子·°K 或848公斤·米/公斤分子·°K 或0.082大气压·米 ³ /公斤分子·°K	8.314焦耳/摩尔·°K	1.987卡/克分子·°K 或0.082大气压·升/克分子·°K 或8.314×10 ⁷ 尔格/克分子·°K

国际制:

因 1 牛顿/米=0.102公斤/米;

1 瓦/米³=10⁻³千瓦/米³;1 千克(质)/米³=0.102公斤·秒²/米⁴。

故

$$d_B = 0.653 \left[\frac{(0.102)^{0.6} \sigma^{0.6}}{(10^{-3})^{0.4} (P_z/V)^{0.4} (0.102)^{0.2} \rho^{0.2}} \right] (H'_0)^{0.5} + 9 \times 10^{-4}$$

或

$$d_B = 4.15 \left[\frac{\sigma^{0.6}}{(P_z/V)^{0.4} \rho^{0.2}} \right] (H'_0)^{0.5} + 9 \times 10^{-4}$$

此式中的 d_B 、 σ 、 (P_z/V) 及 ρ 分别以米，牛顿/米，瓦/米³及千克/米³表示。

第一章 流体流动及流体输送机械

抗生素生产过程中经常要遇到空气、水、发酵液和滤液等气体或液体，尽管种类很多，但它们的流动与输送都遵循着共同的基本规律。本章将简略介绍流体流动的一些基本规律以及输送流体的机械。

第一节 流体的基本性质

一、流体的密度、重度和比容

单位体积流体的质量，称为密度。以符号 ρ 表示。若以 m 代表流体的质量， V 代表流体的体积，则

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

单位体积流体的重量，称为重度。以符号 γ 表示。若以 G 为流体的重量， V 代表流体的体积，则

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

因为重量等于质量乘以重力加速度 g ，则

$$G = mg \text{ 或 } m = \frac{G}{g} \quad (1-3)$$

故

$$\rho = \frac{G}{gV} = \frac{\gamma}{g} \quad (1-4)$$

由式1-4可知，流体的密度为流体重度除以重力加速度。流体的密度和重度的数值与选用的单位制度有关，在工程上，通常选用米-公斤-秒制（即M. K. S制）作为基本度量的单位。由此

重度的单位

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ 公斤/米}^3$$

$$g = 9.81 \text{ 米/秒}^2$$

密度的单位

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{\text{公斤/米}^3}{\text{米/秒}^2} = \frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4}$$

单位重量流体的体积，称为比容。以符号 v 表示，则

$$v = \frac{V}{G} \text{ 即 } v = \frac{1}{\gamma} \text{ 米}^3/\text{公斤} \quad (1-5)$$

也即比容是重度的倒数。

液体的体积随温度的变化不大，随压强的变化极小，如当压强增大到1000大气压时，水的体积只减小5%，所以液体可以看作不可压缩的流体。气体因具有可压缩性和热膨胀性，其重度和密度都随压强和温度的变化而有很大的变化。气体的重度可查有关手册或近似地按理想气体状态方程式来计算。

$$pV = nRT \quad (1-6)$$

式中 p —— 气体压强, 大气压或公斤/米²;

V —— 气体体积, 米³;

n —— 气体的公斤分子数;

T —— 绝对温度, °K;

R —— 气体常数, $R = 0.0821$ 大气压·米³/公斤分子·°K = 848 公斤·米/公斤分子·°K。

在标准状况下, 每公斤分子的任何气体, 其体积皆为 22.4 米³,

$$\text{则} \quad R = \frac{pV}{nT} = \frac{1 \times 22.4}{1 \times 273} = 0.0821 \text{ 大气压} \cdot \text{米}^3 / \text{公斤分子} \cdot ^\circ\text{K}$$

若气体的公斤分子量以 M 表示, 气体的重量为 G 公斤, 则式 1-6 变为 $pV = \frac{G}{M}RT$, 当

P 以大气压表示时, 重度可按式计算:

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{pM}{RT} = 12.2 \frac{pM}{T} \quad (1-7)$$

以 γ_0 代表标准状态时的重度, 则

$$\gamma_0 = 12.2 \frac{p_0 M}{T_0} = \frac{M}{22.4} \quad (1-8)$$

式 1-7 与 1-8 相除

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{12.2 \frac{pM}{T}}{12.2 \frac{p_0 M}{T_0}} = \frac{pT_0}{p_0 T} = \frac{273 \cdot p}{1 \cdot T}$$

即

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \frac{273 \cdot p}{T} = 273 \frac{\gamma_0 p}{T} \quad (1-9)$$

二、混合物的重度

上文介绍的是单一组分的流体重度。在实际生产中经常遇到的是液体混合物及气体混合物。混合物重度的计算方法如式 1-10, 1-11 所示。

当已知各组分的重度分数时

$$\frac{1}{\gamma_m} = \frac{X_1}{\gamma_1} + \frac{X_2}{\gamma_2} + \dots + \frac{X_n}{\gamma_n} \quad (1-10)$$

式中 γ_m —— 混合物的重度, 公斤/米³;

$\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ —— 混合物中各组分的重度, 公斤/米³;

$X_1, X_2, \dots, X_n$ —— 混合物中各组分的重量分数。

当已知各组分的体积分数时

$$\gamma_m = \gamma_1 a_1 + \gamma_2 a_2 + \dots + \gamma_n a_n \quad (1-11)$$

式中 $a_1, a_2, \dots, a_n$ —— 流体混合物中各组分的体积分数 (如为气体混合物时, 也可用分子分数)。

理想气体混合物的重度也可以用前述的式 1-7 来计算, 但式中的 M 应采用混合气体的平均分子量 M_m 。

$$\gamma_m = \frac{pM_m}{RT} \quad (1-12)$$

$$M_m = M_1 a_1 + M_2 a_2 + \dots + M_n a_n \quad (1-13)$$

式中 $M_1, M_2, \dots, M_n$ 为气体混合物中各组分的分子量。

〔例1-1〕 若空气的组分为21%的 O_2 , 78%的 N_2 , 1%的Ar (体积百分数)。试求: ①标准状态时空气的重度。② 在2大气压 (表压) 100℃时空气的重度。

解: ① 由式1-8计算

$$\text{空气的平均重度 } \gamma_m = \frac{M_m}{22.4}$$

$$\begin{aligned} \text{空气的平均分子量 } M_m &= M_{O_2} \cdot a_{O_2} + M_{N_2} \cdot a_{N_2} + M_{Ar} \cdot a_{Ar} \\ &= 32 \times 0.21 + 28 \times 0.78 + 39.9 \times 0.01 = 28.96 \end{aligned}$$

$$\text{故标准状态下, 空气的重度 } \gamma_0 = \frac{M_m}{22.4} = \frac{28.96}{22.4} = 1.293 \text{ 公斤/米}^3$$

② 由式1-9计算

$$\gamma = \gamma_0 \times \frac{273p}{T} = 1.293 \times \frac{273 \times (2+1)}{(273+100)} = 2.84 \text{ 公斤/米}^3$$

三、流体的浓度

流体的浓度可有多种表示方法, 除重量百分浓度、体积百分浓度、克分子浓度和克当量浓度外, 在工程上还经常要用公斤分子百分比浓度 (简称分子分数浓度) 与单位体积公斤分子数 (公斤分子/米³) 来表示。

(1) 公斤分子百分比 (分子分数) 例如某流体 (气体或液体) 混合物中含 A、B 及 C 三种组分, 其重量百分比浓度分别为 $X_A\%$ 、 $X_B\%$ 及 $X_C\%$, 组分的分子量分别为 M_A 、 M_B 及 M_C , 则在100公斤混合物中三种组分的公斤分子数分别为 $\frac{X_A}{M_A}$ 、 $\frac{X_B}{M_B}$ 及 $\frac{X_C}{M_C}$,

$$\text{总公斤分子数 } n = \frac{X_A}{M_A} + \frac{X_B}{M_B} + \frac{X_C}{M_C}$$

各组分的公斤分子百分比 (分子分数) 分别为 n_A 、 n_B 及 n_C 。

$$n_A = \frac{\frac{X_A}{M_A}}{\frac{X_A}{M_A} + \frac{X_B}{M_B} + \frac{X_C}{M_C}} \times 100\% \quad (1-14)$$

$$n_B = \frac{\frac{X_B}{M_B}}{\frac{X_A}{M_A} + \frac{X_B}{M_B} + \frac{X_C}{M_C}} \times 100\% \quad (1-15)$$

$$n_C = \frac{\frac{X_C}{M_C}}{\frac{X_A}{M_A} + \frac{X_B}{M_B} + \frac{X_C}{M_C}} \times 100\% \quad (1-16)$$

而

$$n_A + n_B + n_C = 1$$

(2) 单位体积公斤分子数 若混合物的重度为 γ_m 公斤/米³, 则每米³混合物的总重量为 γ_m 公斤, 故每米³混合物中三种组分的公斤分子数 N_A , N_B , N_C 分别为

$$N_A = \frac{\gamma_m X_A}{M_A} \text{ 公斤分子/米}^3 \quad (1-17)$$

$$N_B = \frac{\gamma_m X_B}{M_B} \text{ 公斤分子/米}^3 \quad (1-18)$$

$$N_C = \frac{\gamma_m X_C}{M_C} \text{ 公斤分子/米}^3 \quad (1-19)$$

四、流体的压强

(1) 静压强及其单位 每单位面积上所受到的流体垂直方向的作用力, 称为流体的静压强, 以符号 P 表示。若作用力为 P 公斤, 受力面积为 F 米², 则

$$p = \frac{P}{F} \text{ 公斤/米}^2 \quad (1-20)$$

压强的单位除用公斤/米²表示外, 还可以用大气压、汞柱高度或以其它流体的高度表示。

1 大气压相当于每平方厘米面积上受 1.033 公斤的压力, 相当于 760 毫米汞柱高的压强或 4℃ 时 10.33 米水柱高的压强, 此种大气压称为物理大气压。但工业上为了计算便利, 常用 1 大气压相当于 1 公斤/厘米² 或 10 米水柱高的压强为单位, 称为工程大气压。工程大气压与物理大气压的各种表示方式有如下关系:

$$1 \text{ 工程大气压} = 1 \text{ 公斤/厘米}^2 = \frac{760}{1.033} \text{ 毫米汞柱} = 735.6 \text{ 毫米汞柱} = 10 \text{ 米水柱}$$

(2) 绝对压强和表压、真空度 流体压强的实际数值称为绝对压强, 压力表的读数称为表压强。

绝对压强 = 大气压强 + 表压强

如果气体的压强低于当时当地的大气压, 那么真空表上的读数是指所测气体压强低于大气压的部分, 这部分压强就称为真空度。

真空度 = 大气压强 - 绝对压强

图1-1表示绝对压强、表压与真空度的关系。

(3) U形计的测压 静压强的测量除用压强表、真空表外, 还常用液柱压强计来测量较小的压强。U形计就是最常用的一种测量工具。通常用它来测量两点的压强差, 如图1-2所示。

在 I-I 剖面上,

$$p_a = p_i + h\gamma$$

$$p_b = p_2 + (h - R)\gamma + R\gamma_i$$

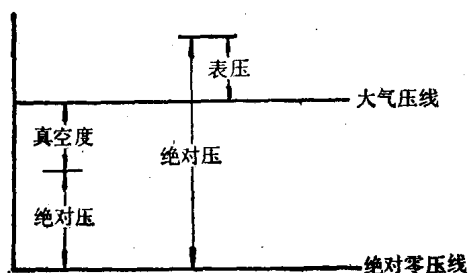


图 1-1 绝对压、表压与真空度的关系

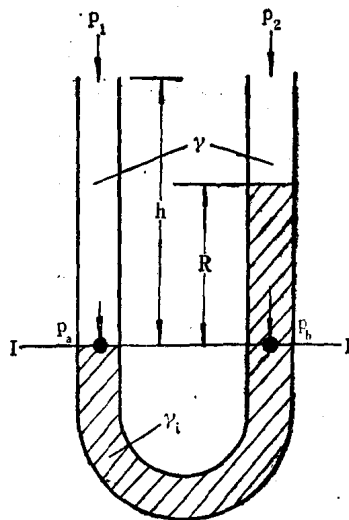


图 1-2 U形测压计

因

$$p_a = p_b$$

$$p_1 + h\gamma = p_2 + (h - R)\gamma + R\gamma_1$$

$$p_1 - p_2 = R(\gamma_1 - \gamma)$$

即

$$\Delta p = p_1 - p_2 = R\Delta\gamma \quad (1-21)$$

式中 p_1, p_2 ——流体的压强, 公斤/米²;

Δp ——压强差, 公斤/米²;

γ ——流体的重度, 公斤/米³;

γ_1 ——指示液的重度, 公斤/米³;

R ——指示液液面高度差, 米;

h ——流体柱高度, 米。

从上式可见, 在 $\Delta\gamma$ 为一定时, 两流体的压强差 Δp 与读数 R 成正比。所以应考虑选择U形计中的流体, 使读数 R 比较恰当, 不致太大或太小, 既方便读数, 又保证足够的精确度。

五、流量和流速

在流体流动过程中, 每单位时间内流体通过导管的量, 称为流量。流量若用体积来计量, 就称为体积流量, 用符号 $V_{\text{体}}$ 表示, 单位为米³/秒。如果流量用重量来计量, 就称为重量流量, 用符号 $W_{\text{重}}$ 表示, 单位为公斤/秒。流体通过单位导管截面积的体积流量, 称为体积流速, 简称流速用符号 w 来表示, 它的单位是米/秒, 其物理意义是每单位时间内流体质点在导管内流过的距离。实际上, 流体通过导管截面上各点的流速是不同的, 管中心流速最大, 离管中心愈远, 流速就愈慢, 而在管壁上, 流速为零。所以我们通常所讲的流速是指导管整个截面积的平均流速。考虑到流体的体积随温度和压强变化, 有时用通过导管单位截面的重量流量来表示流速, 称为重量流速, 以符号 G' 表示。

重量流量、体积流量、重量流速和体积流速四者的关系为

$$W_{\text{重}} = V_{\text{体}}\gamma \text{ 公斤/秒} \quad (1-22)$$

$$w = \frac{V_{\text{体}}}{F} \text{ 米/秒} \quad (1-23)$$

$$G' = \frac{W_{\text{重}}}{F} = \frac{V_{\text{体}}\gamma}{F} = w\gamma \text{ 公斤/米}^2 \cdot \text{秒} \quad (1-24)$$

式中 $W_{\text{重}}$ ——重量流量, 公斤/秒;

$V_{\text{体}}$ ——体积流量, 米³/秒;

w ——体积流速或简称流速, 米/秒;

G' ——重量流速, 公斤/米²·秒;

γ ——流体的重度, 公斤/米³;

F ——导管截面积, 米²。

通常所谓的流量和流速, 一般均指体积流量 $V_{\text{体}}$ 和体积流速 w 。

六、流体的粘度

流体都具有一定的流动性。有的流体流动性很好, 有的流体稠厚, 流动性很差。粘度是衡量流体流动性的物理量, 它反映流体在流动时产生的内摩擦力。由于流体间存在着内摩擦力, 因而在导管中流体的速度随离管中心的距离而变化, 见图1-3。