

化工原理习题解析

上册

余立新 戴猷元 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书为“北京市高等教育精品教材立项项目”《化工原理》(第2版)上册的配套教材,“化工原理”课程同时还是清华大学一类课程和精品课程建设项目。本书对教材中的所有习题进行了解答和分析,分上下两册。上册对绪论、流体流动、流体输送机械、流体通过颗粒和颗粒层的流动、非均相混合物的分离、传热和蒸发等7章的习题进行了解答和分析。

本书适合高等院校化工、生物化工、环境、食品、轻工、制药和材料等专业的师生,以及从事上述专业的设计、开发和操作人员阅读参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

化工原理习题解析. 上册/余立新,戴猷元编著. —北京:清华大学出版社,2005.1
ISBN 7-302-09635-X

I. 化… II. ①余… ②戴… III. 化工原理—高等学校—解题 IV. TQ02-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 101770 号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 客 户 服 务: 010-62776969

组稿编辑: 柳 萍

文稿编辑: 黎 强

印 刷 者: 北京牛山世兴印刷厂

装 订 者: 北京市密云县京文制本装订厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 170×230 印 张: 14.75 字 数: 269 千字

版 次: 2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-09635-X/TQ·19

印 数: 1~2000

定 价: 19.80 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

前 言

习题是教科书的有机组成部分。通过演算习题,可以进一步加深对基本知识的理解和掌握。

在清华大学化工系化工原理教研组多年教学的基础上,我们编写了这套习题解析。它不仅对《化工原理》(第2版)书中的习题进行了解答,还对其进行了一定的分析,这有助于学生对课堂知识和工程知识的综合掌握。

虽然关于化工原理习题题解的书已经有若干种了,但是我们还是愿意再奉献一套,主要目的是向同学们展示,对于同样的题目,可以有不同的思路和理解,可以帮助学生更加全面深入地掌握基本原理。

本书给出了所有习题的解题步骤。之所以给出所有的步骤,而不是仅给出“标准”答案,是因为我们更加注重解决问题的思路。思路 and 结果同样重要。如果思路不对,而恰巧结果相同或者相似,很容易让学生感觉到自己已经掌握了所学内容,而实际上可能没有掌握。

本书的解题思路借鉴了美国的 Phillip C. Wankat 在《Equilibrium Staged Separations》一书中介绍的7步解题法。这7步是:

0. 我愿意做并且我能够完成;

1. 对问题进行界定;

2. 思考;

3. 计划;

4. 解答;

5. 检查;

6. 总结归纳。

步骤0涉及做题的动力和自信问题。通过解题可以了解“我已经在化学工程领域内有如此的能力了”。解的题目类型越多,对解决问题也就越熟练。一定要学会愿意并且相信自己能够求解化学工程问题。

步骤1要求界定好问题。仔细审题,字斟句酌,画出草图,做出标示,列出所有已知的条件和约束条件,明确题目要求完成什么。如果不能明确地界定问题,恐怕就不能解答它。

步骤2要求进一步思考。哪些是真正要求完成的任务?应该使用哪些基本的原理?是否能够找出一个简化的极限解,从而将答案限定在一定的范围内?

题目给出的条件是多还是少? 仔细反复考虑该问题,再返回步骤 1 进行检验,看是否要修正。有经验的解题者虽然不把该步骤明确地写出来,但是思考是少不了的。

步骤 3 要求将问题有计划地分成若干块,并确定需要首先解决的分块。此时需要选出合适的理论和原理,以及使用的数学方法。在汇总的过程中,子问题可能还需要进一步分解。

步骤 4 是开始真正做答,没有经验者往往将该步骤作为解题的第一步。在本步骤中将进行数学运算并且得到答案。如果前面计划做得不全面,可能完成不了本步骤的工作,需要返回前述步骤重新思考和计划。

步骤 5 要求对答案进行检验。数量级对吗? 比如,实际的精馏塔不可能只有 30 cm 或者 3 000 m 那么高。答案看起来合理吗? 代入数字时是否有笔误? 使用计算器时是否按错了键? 是否能够通过另外的解题途径来相互验证? 如果发现错误或者不一致的地方,就要返回前面重新计算。

步骤 6 是归纳总结。该步骤非常重要,但是经常被忽略。通过归纳总结,可以尽可能多地从题目的解析过程中获取知识。

本书的另一个特点是对部分题目本身的“合理性”也进行了分析,相信这将帮助学生进一步开阔思路。

早在 1992 年,清华大学化工原理教研组的老师就准备过一套习题解答草稿,其中王保国对第 1 章(流体流动)和第 2 章(流体输送机械),林爱光对第 3 章(流体通过颗粒和颗粒层的流动)和第 4 章(非均相混合物的分离),陈翠仙对第 5 章(传热)和第 6 章(蒸发),刘茂林对第 8 章(吸收)和第 13 章(吸附分离),李琳对第 9 章(蒸馏),雷良恒对第 11 章(液液萃取),刘芳对第 12 章(干燥)分别编写了习题的解答,这些努力对于本书的形成有一定的参考价值。

本书新增了第 0 章(绪论)、第 7 章(传质分离过程概论),第 14 章(膜分离)和第 15 章(其他分离方法)等章节的习题解析。在此,作者还要感谢蒋维钧教授,因为与蒋教授的讨论和交流使我们获益良多。

作者

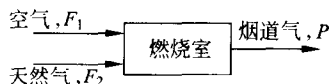
目 录

0 绪论	1
1 流体流动	9
2 流体输送机械	84
3 流体通过颗粒和颗粒层的流动	100
4 非均相混合物的分离	110
5 传热	136
6 蒸发	217

0 绪 论

0-1 一加热炉用空气(含 O_2 0.21, N_2 0.79)燃烧天然气(不含 O_2 与 N_2)。分析燃烧所得烟道气,其组成(摩尔分数)为 0.07 CO_2 , 0.14 H_2O , 0.056 O_2 , 0.734 N_2 。求每通入 100 m^3 , 30°C 的空气能产生多少 m^3 烟道气(烟道气温度为 300°C , 炉内为常压)?

解



题 0-1 图

由于天然气中不含 N_2 , 故烟道气中所有 N_2 均来自于空气, 对 N_2 进行物料衡算即可求解所需值。

每 100 m^3 , 30°C 空气的摩尔数为

$$F_1 = \frac{100}{22.4} \times \frac{273}{273 + 30} = 4.022\text{ kmol}$$

其中含 N_2 的摩尔数为 $0.79F_1 = 3.178\text{ kmol}$, 于是有

$$3.178 = \frac{P}{22.4} \times \frac{273}{273 + 300} \times 0.734$$

可得

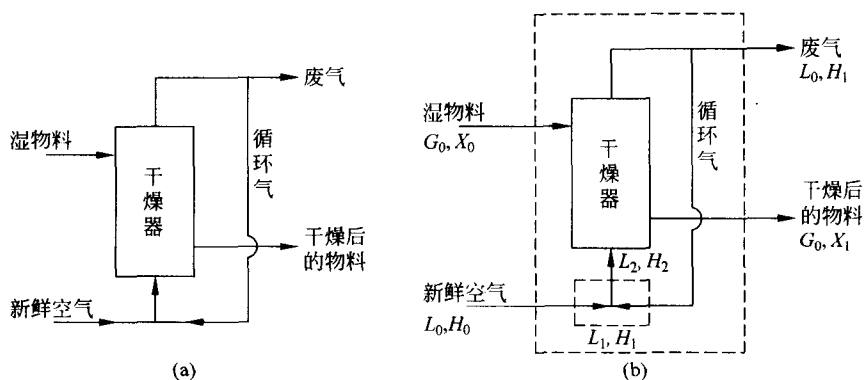
$$P = 203.54\text{ m}^3 (300^\circ\text{C}, \text{常压})$$

分析

物料衡算是化工原理中非常有用的一个工具。做物料衡算时应该以质量或摩尔数为基准。

0-2 见题 0-2 图(a), 一连续操作的干燥器用热空气干燥湿物料。为提高干燥系统的热效率, 使部分废气循环。循环的废气和新鲜空气混合后进入干燥器。新鲜空气中含水的质量分数(下同)为 0.01, 湿物料中含水 0.15, 干燥后的物料含水 0.05, 干燥器排出的废气中含水 0.10, 新鲜空气和循环废气的混合气含水 0.03。计算每送入 1 t 湿物料时:

- (1) 需要多少新鲜空气? 干燥出多少干物料? 排出多少废气?
- (2) 循环的废气量为多少?



题 0-2 图

解

(1) 对题 0-2 图(b)大虚线框内的总系统进行物料衡算。设新鲜空气中干空气的用量为 L_0 kg, 其中每 kg 干空气中含有水分 $H_0 = 0.01/(1 - 0.01) = 0.0101$ kg 水/kg 干空气; 废气中干空气的量仍为 L_0 , 水含量为

$$H_1 = \frac{0.10}{1 - 0.1} = 0.11 \text{ kg 水 / kg 干空气}$$

湿物料中绝干物料的量 $G_0 = 1000 \text{ kg} \times (1 - 0.15) = 850 \text{ kg}$; 其中水含量为 $X_0 = \frac{0.15}{1 - 0.15} = 0.176 \text{ kg 水 / kg 干物料}$ 。干燥后物料中绝干物料的量不变, 其中水含量 $X_1 = \frac{0.05}{1 - 0.05} = 0.0526 \text{ kg 水 / kg 干物料}$ 。然后对水分进行衡算, $L_0(H_1 - H_0) = G_0(X_0 - X_1)$, 即可得 $L_0 = 1053.4 \text{ kg}$ 。于是, 新鲜空气用量为

$$L_0(1 + H_0) = 1064 \text{ kg}$$

废气量为

$$L_0(1 + H_1) = 1169.3 \text{ kg}$$

得到干燥好的物料

$$G_0(1 + X_1) = 894.7 \text{ kg}$$

(2) 对混合过程(小虚框)进行水和干空气的物料衡算:

$$L_0 H_0 + L_1 H_1 = L_2 H_2$$

$$L_0 + L_1 = L_2$$

其中 $H_2 = \frac{0.03}{1-0.03} = 0.0309 \text{ kg 水/kg 干空气}$, 于是便可求出

$$L_1 = L_0 \frac{H_2 - H_0}{H_1 - H_2} = 277.5 \text{ kg}$$

即循环气体的量为

$$L_1(1 + H_1) = 308.3 \text{ kg}$$

分析

(1) 废气能够提高热效率吗? 请结合干燥过程(见《化工原理(第2版)·下册》, 以下简称下册)进行分析。

(2) 干燥过程中汽化水分需要消耗热量, 热量的计算可以通过能量衡算求出。

(3) 干燥器的结构尺寸如何确定? 将通过动力学计算求出。

(4) 物料能够被干燥的极限程度如何? 废气中水的含量最高为多少? 将由热力学控制。

于是, 我们知道了以下4个关系是化工原理的核心: 物料衡算, 能量衡算, 平衡关系, 速率方程。

0-3 一矿物含 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 的质量分数为 0.65, 用 100°C 热水将它从矿石中溶解出来(浸取)。分离出不溶于水的矿渣后, 将溶液冷却结晶, 在 0°C 下得到 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 结晶, 所余母液循环使用。过程连续操作, 流程如题 0-3 图(a)所示。

已知 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 在 100°C 热水中的溶解度为 $34 \text{ g}/100 \text{ g 水}$, 在 0°C 时为 $5 \text{ g}/100 \text{ g 水}$, 矿渣中含溶液 0.15, 结晶中含溶液 0.10。求处理每吨矿物所需的水量 $A(\text{kg})$, 产生的湿矿渣量 $B(\text{kg})$, 湿结晶量 $C(\text{kg})$ 和母液量 $D(\text{kg})$ 。

为简化计算, 假定:

- (1) 矿渣内不含 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$;
- (2) 矿渣不溶于水;
- (3) 结晶能从结晶器全部分离出来。

解

每 1000 kg 矿石中含 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 650 kg , 矿渣 350 kg , 于是湿矿渣量为

$$B = 350 / (1 - 0.15) = 411.76 \text{ kg}$$

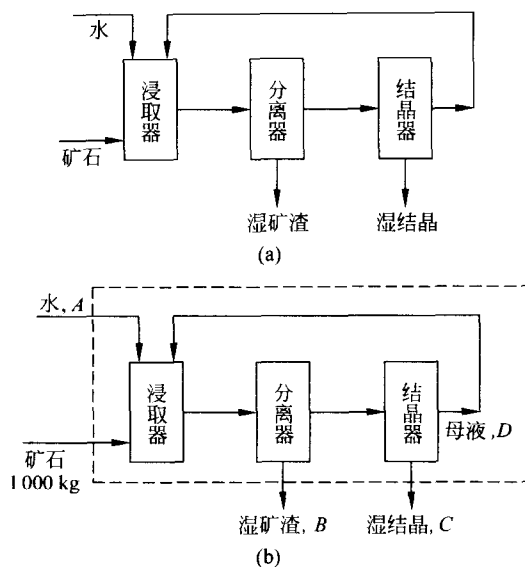
其中含有 100°C 的饱和溶液

$$411.76 - 350 = 61.76 \text{ kg}$$

该溶液中含有 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$

$$61.76 \times \frac{34}{34 + 100} = 15.67 \text{ kg}$$

湿结晶中 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 的量可根据整个系统中 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 的物料衡算[题 0-3



题 0-3 图

图(b)中的虚线框]求出,为

$$650 - 15.67 = 634.33 \text{ kg}$$

湿结晶的量 C 等于结晶量 $(0.9C)$ 和 0°C 下的饱和溶液量 $(0.1C)$ 之和,于是,对于湿结晶中 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 而言

$$0.9C + 0.1C \times \frac{5}{5+100} = 634.33$$

所以, $C = 701.1 \text{ kg}$ 。

所需水量 A 等于湿矿渣中带出的水分 $(61.76 - 15.67 = 46.09 \text{ kg})$ 和湿结晶中带出的水分 $\left[0.1C \times \left(1 - \frac{5}{5+100}\right) = 66.77 \text{ kg}\right]$ 之和,即 $A = 112.86 \text{ kg}$ 。

由于从浸取器流出的溶液假定为 100°C 的饱和溶液,故对浸取器进行 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 的物料衡算可得

$$\frac{34}{100} = \frac{650 + D \times \frac{5}{5+100}}{112.86 + D \times \left(1 - \frac{5}{5+100}\right)}$$

于是得知母液量为 $D = 2214.5 \text{ kg}$ 。

分析

本题中涉及到了浸取操作(下册)、固液分离操作[过滤或离心分离等,见《化工原理(第2版)·上册》,以下简称上册]、结晶(下册)以及暗含的换热过程(使

低温的矿石和母液升到 100°C , 使 100°C 的溶液冷却到 0°C) 和输送过程[流体(水和母液)的输送, 固体的输送, 以及固液两相流的输送]等。

此处仅仅做了一个初步的设计计算, 主要目的仅是练习物料衡算。

0-4 某容器内装 $1\,000\text{ L}$ 质量分数为 0.95 的乙醇水溶液, 其密度为 804 kg/m^3 。现用纯水以 100 kg/min 的速率进入容器置换, 并以同样的速率放出乙醇溶液, 假设容器内混合良好。试求要使容器内乙醇溶液的质量分数变为 0.05 , 需要多少时间?

解

原始溶液的质量为 $1\,000 \times 804 = 840\text{ kg}$, 其中含乙醇 $x_0 = 0.95$ 。

设在时刻 $t(\text{min})$ 时, 乙醇的含量为 x 。在 $t \rightarrow t + dt$ 的时间间隔内进行乙醇的物料衡算, 可得

$$100xdt = -dx \times 840$$

分离变量得

$$dt = -8.4 \frac{dx}{x}$$

积分

$$\int_0^t dt = -8.4 \int_{x_0}^{x_e} \frac{dx}{x}$$

于是

$$t_e = -8.4 \ln \frac{x_e}{x_0} = 8.4 \times \ln \frac{0.95}{0.05} = 24.73\text{ min}$$

分析

经过 24.73 min 的置换, 原来的 840 kg 工业酒精(95%)变成了 840 kg 的 5% 的稀酒精以及 $2\,473\text{ kg}$ 的 30.6% 的稀酒精。这里仅为非稳态过程的物料衡算练习。除非工艺过程中需要这两种浓度的稀酒精, 否则将它们再变回 95% 可就非常困难了(见下册的精馏部分)。

0-5 在换热器中用 200 kN/m^2 的饱和蒸汽将流量为 5 t/h 的某种气体从 293 K 加热到 353 K , 气体的比热容 $c_p = 1\,024 + 0.088\,53T$, 其中 T 为温度, 单位为 K , c_p 的单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。饱和蒸汽的用量为 142 kg/h , 蒸汽冷凝后以 90°C 的水排出, 问此换热器的热损失占水蒸气所提供热量的百分数为多少?

解

水蒸气提供的总热量为

$$Q_1 = 142(r + \Delta T_{c_{pw}})$$

其中 r 为 200 kPa 的水蒸气的冷凝潜热, 为 2 204.6 kJ/kg; ΔT 是水蒸气温度 120.2℃ 与 90℃ 之间的温差, 为 30.2℃; c_{pw} 是该温度区间水的定压比热容, 为 4.23 kJ/(kg·℃), 故

$$Q_1 = 3.31 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

气体获得的热量为

$$Q_2 = 5\,000 c_{pg} \Delta t$$

其中 c_{pg} 是 293 K 到 353 K 之间气体的平均比热容:

$$c_{pg} = 1\,024 + 0.088\,53 \times 323 = 1\,053 \text{ J/(kg} \cdot \text{℃)} = 1.053 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{℃)}$$

$\Delta t = 60^\circ\text{C}$, 故 $Q_2 = 3.16 \times 10^5 \text{ kJ/h}$ 。

于是损失的热量为

$$Q_L = Q_1 - Q_2 = 0.15 \times 10^5 \text{ kJ/h}$$

$$Q_L/Q_1 = 4.5\%$$

分析

此题练习总的热量衡算, 通过总热量衡算可以求出加热介质的用量以及温度等参数, 进而求出加热功率。但仅有总热量衡算并不能确定换热器的换热面积(即设备的尺寸), 欲求换热面积就必须运用换热速率的知识, 这将在第 5 章传热中详细介绍。

0-6 1 500 盒土豆汤罐头在 116℃ 的蒸锅中进行热处理, 取出前用冷却水冷却到 38℃。冷却水进、出口温度分别为 24℃ 和 30℃, 计算冷却水用量。已知每盒罐头汤液的质量为 0.45 kg, 空金属盒的质量为 0.07 kg, 汤的平均比热容为 3.95 kJ/(kg·K), 金属盒的平均比热容为 0.502 kJ/(kg·K), 在蒸锅中用来存放罐头的金属架的质量为 160 kg, 其平均比热容亦为 0.502 kJ/(kg·K), 假设金属架由 116℃ 冷却到 33℃; 将锅壁由 116℃ 冷却到 38℃ 时需移走的热量为 1×10^4 kJ, 冷却期间蒸锅向四周散热量估计为 5×10^3 kJ。

解

根据 $Q = c_p m \Delta t$ 即可求出冷却水用量。其中 c_p 是水在 24℃ 到 30℃ 之间的定压比热容, $c_p = 4.17 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{℃)}$, $\Delta t = 30 - 24 = 6^\circ\text{C}$, Q 是冷却罐头、金属架、锅壁等所需的热量 Q_1 与散热量 Q_L 之差。

$$Q_1 = 1\,500 \times 0.45 \times (116 - 38) \times 3.95 + 1\,500 \times 0.07 \times (116 - 38) \times 0.502 + 160 \times 0.502 \times (116 - 33) + 1 \times 10^4$$

$$Q_L = 5 \times 10^3 \text{ kJ}$$

于是

$$Q = Q_1 - Q_L = 2.24 \times 10^5 \text{ kJ}$$

用水量为

$$m = \frac{Q}{c_p \Delta t} = 8\,943 \text{ kg}$$

分析

与题 0-6 相同, 此处只能求出总的换热需求及介质用量, 冷却方式和冷却时间等则只能根据传热的动力学知识方能求解。

0-7 试将下列物理量换算成指定的单位。

质量: $1.5 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kg};$

密度: $13.6 \text{ g/cm}^3 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kg/m}^3;$

压力: $35 \text{ kgf/cm}^2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Pa},$

$4.7 \text{ atm} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Pa},$

$670 \text{ mmHg} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Pa};$

功率: $10 \text{ 马力} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kW};$

比热容: $2 \text{ Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}),$

$3 \text{ kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K});$

流量: $2.5 \text{ L/s} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m}^3/\text{h};$

表面张力: $70 \text{ dyn/cm} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ N/m},$

$5 \text{ kgf/m} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ N/m}.$

解

质量: $1.5 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m} = 1.5 \times 9.806\,65 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m} = 14.71 \text{ kg};$

密度: $13.6 \text{ g/cm}^3 = 13.6 \times 10^{-3}/10^{-6} \text{ kg/m}^3 = 13.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3;$

压力: $35 \text{ kgf/cm}^2 = 35 \times 98.07 \times 10^3 \text{ Pa} = 3.432 \times 10^6 \text{ Pa},$

$4.7 \text{ atm} = 4.7 \times 1.013\,25 \times 10^5 \text{ Pa} = 4.762 \times 10^5 \text{ Pa},$

$670 \text{ mmHg} = 670 \times 133.32 \text{ Pa} = 8.932 \times 10^4 \text{ Pa};$

功率: $10 \text{ 马力} = 10 \times 0.745\,69 \text{ kW} = 7.456\,9 \text{ kW};$

比热容: $2 \text{ Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}) = 2 \times 4.186\,8 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 8.373\,6 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}),$

$3 \text{ kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) = 3 \times 4.186\,8 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 12.560\,4 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K});$

流量: $2.5 \text{ L/s} = 2.5 \times 10^{-3}/(1/3\,600) \text{ m}^3/\text{h} = 9 \text{ m}^3/\text{h};$

表面张力: $70 \text{ dyn/cm} = 70 \times 10^{-5}/10^{-2} \text{ N/m} = 0.07 \text{ N/m},$

$5 \text{ kgf/m} = 5 \times 9.806\,65 \text{ N/m} = 49.033 \text{ N/m}.$

分析

虽然在我国现在已规定必须使用法定的 SI 单位,但是在西方国家(特别是美国和英国等)的科技书籍和手册中,英制单位还用得相当普遍,比如 psi, °F, in 和 lb 等。因此,正确地进行各单位之间的换算是科技工作者的基本功之一。

0-8 在气体状态方程中 $R=0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$, 求用 $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 为单位时, R 值等于多少?

解

$$R = 0.082 \times \frac{101.325 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{K}} = 8.31 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

0-9 在 $0^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$ 的范围内, 空气的定压比热容可按式计算:

$$c_p = 0.2377 + 4.466 \times 10^{-5} T \quad [\text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$$

式中温度 T 的单位为 $^\circ\text{C}$ 。若要将其单位改为热力学温度 K , c_p 的单位改为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 试将上式加以变换。

解

$$\begin{aligned} c_p &= 0.2377 + 4.466 \times 10^{-5} T \quad [\text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})] \\ &= [0.2377 + 4.466 \times 10^{-5} (t - 273.2)] \times 4.1868 \times 10^3 \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \\ &= 995.202 + 0.1870t - 51.084 \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \\ &= 944.118 + 0.1870t \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \end{aligned}$$

(t 的单位用 K)

分析

很多早期的经验式或关联式中都没有使用 SI 单位, 在使用这些式子的时候可以按照原式中的要求代入所需的单位, 也可以先变换后再使用。变换之后, 可以代入一两个数据试算一下以验证是否正确。

比如在本例中, 计算一下 0°C 时的 c_p 。用原式得出 $c_p = 0.2377 \text{ kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 用变换后的式子为 $c_p = 944.118 + 0.1870 \times 273.2 = 995.2064 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。二者完全一致, 说明变换正确。

1 流体流动

1-1 燃烧重油所得的燃烧气,经分析得知其中含 CO_2 8.5%, O_2 7.5%, N_2 76%, H_2O 8%(体积分数),试求在温度为 500°C , 压力为 0.1 MPa 时,该混合气体的密度。

解

混合气体的平均相对分子质量为

$$M_m = 0.085 \times 44 + 0.075 \times 32 + 0.76 \times 28 + 0.08 \times 18 = 28.86$$

$$\rho_{500^\circ\text{C}, 0.1\text{ atm}} = \rho_{0^\circ\text{C}, 1\text{ atm}} \times \frac{T_{0^\circ\text{C}}}{T_{500^\circ\text{C}}} = \frac{28.86}{22.4} \times \frac{273}{273 + 500} = 0.455\text{ kg/m}^3$$

分析

在进行流体流动的计算时,常常用到密度和黏度,特别是混合流体的黏度和密度,因此练习这些值的求取是有必要的。

1-2 求 50°C 的烟道气的黏度。烟道气的组成为 N_2 79%, CO_2 16%, O_2 5%(体积分数)。常压下气体混合物的黏度 μ_m 可按下式计算:

$$\mu_m = \frac{\sum y_i \mu_i M_i^{\frac{1}{2}}}{\sum y_i M_i^{\frac{1}{2}}}$$

式中 y_i, μ_i, M_i 分别为组分 i 的摩尔分数、黏度和相对分子质量。

解

利用上册附录 K 的气体与蒸气黏度共线图查得 50°C 下,有

$$\text{N}_2 \quad \mu = 0.0186\text{ MPa} \cdot \text{s}$$

$$\text{CO}_2 \quad \mu = 0.0164\text{ MPa} \cdot \text{s}$$

$$\text{O}_2 \quad \mu = 0.0216\text{ MPa} \cdot \text{s}$$

$$\mu_m = \frac{0.79 \times 0.0186 \times \sqrt{28} + 0.16 \times 0.0164 \times \sqrt{44} + 0.05 \times 0.0216 \times \sqrt{32}}{0.79 \times \sqrt{28} + 0.16 \times \sqrt{44} + 0.05 \times \sqrt{32}}$$

$$= 0.0183\text{ MPa} \cdot \text{s}$$

分析

这是求算混合气体黏度的一种方法。

为什么黏度与相对分子量的 $1/2$ 次方有关?

还需注意比较上册中的附录 J 和附录 K。液体黏度随温度升高而降低,而

气体黏度随温度升高而增大,这是为什么?

1-3 在大气压为 0.101 MPa 的地区,某真空蒸馏塔塔顶真空表的读数为 0.095 MPa。若在大气压为 0.088 MPa 的地区使该塔内绝对压力维持相同的数值,则真空表的读数应为多少?

解

在 0.101 MPa 时真空蒸馏塔塔顶的绝对压力为

$$p_{\text{绝}} = 0.101 - 0.095 = 0.006 \text{ MPa}$$

在 0.088 MPa 时,真空表读数应为

$$0.088 - 0.006 = 0.082 \text{ MPa}$$

分析

(1) 真空表和压力表的读数均为正值,真空度=当地大气压-绝压;表压=绝压-当地大气压。

(2) 在本例中,塔顶绝对压力与塔顶液体的组成和温度相关。

1-4 敞口容器底部有一层深 0.52 m 的水($\rho=1\,000 \text{ kg/m}^3$),其上为深 3.46 m 的油($\rho=916 \text{ kg/m}^3$)。求容器底部的压力(Pa),并需注明是绝对压力还是表压。

解

$$\begin{aligned} p_{\text{底}} - p_0 &= \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2 \\ &= 916 \times 9.81 \times 3.46 + 1\,000 \times 9.81 \times 0.52 \\ &= 3.62 \times 10^4 \text{ Pa} \end{aligned}$$

因此,容器底部压力为 $3.62 \times 10^4 \text{ Pa}$ (表压)。

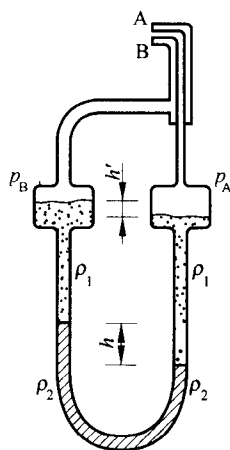
分析

此时(敞口时)根据表压来估算容器内液面比较方便。

1-5 用一微差压差计测量皮托管流速计(测量气体流速)两接口间的压差,两液体的密度分别为 900 kg/m^3 与 $1\,000 \text{ kg/m}^3$,U 形管内径为 8 mm,扩大室内径为 80 mm,测得读数为 200 mm,求压差为多少?又若扩大室的内径为 40 mm,则读数应为多少?两种情况测得的压差值与压差的真值间的误差各为多少?(注:未测压差时,两扩大管中的液面高度相同)

解

设压力高的一侧压力为 p_A ,另一侧压力为 p_B 。压差计内密度小的液体密度为 ρ_1 ,密度大的液体为 ρ_2 。



题 1-5 图

(1) 压差计扩大室内径为 80 mm 时,其面积与 U 形管面积之比为 100 : 1,所以相同体积的液体在扩大室与 U 形管中所占据的高度之比为 1 : 100,扩大室内液体的液位差 h' 为 U 形管内液位差 h 的 $\frac{1}{100}$,根据静力学方程有

$$\begin{aligned} p_A + \rho_1 g h &= p_B + \rho_2 g h + \rho_1 g h' \\ p_A - p_B &= g h (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1 g h' \\ &= 9.8 \times 0.2 \times (1000 - 900) + 900 \times 0.002 \times 9.8 \\ &= 213.64 \text{ Pa} \end{aligned}$$

(2) 若扩大室内径为 40 mm,则其面积与 U 形管面积之比为 25 : 1,所以相同体积的液体在扩大室与 U 形管中所占据的高度之比为 1 : 25,根据静力学方程,有

$$p_A - p_B = g h (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1 g \frac{h}{25} = 213.64 \text{ Pa}$$

于是可知 $h = 160 \text{ mm}$ 。

(3) 若忽略 h' 的影响,则根据 h 为 200 mm 和 160 mm 两个读数计算出的压差便有误差。

当扩大室的内径为 80 mm 时, $(p_A - p_B)' = 9.8 \times (1000 - 900) \times 0.2 = 196 \text{ Pa}$,误差为 17.64 Pa,相对误差为 8.3%;当扩大室的内径为 40 mm 时, $(p_A - p_B)' = 9.8 \times (1000 - 900) \times 0.16 = 156.8 \text{ Pa}$,误差为 39.2 Pa,相对误差为 18.3%。

分析

(1) 教科书中讲扩大室内径和 U 形管内径之比至少应为 10 以上,通过此处的计算应该有了定量的了解。

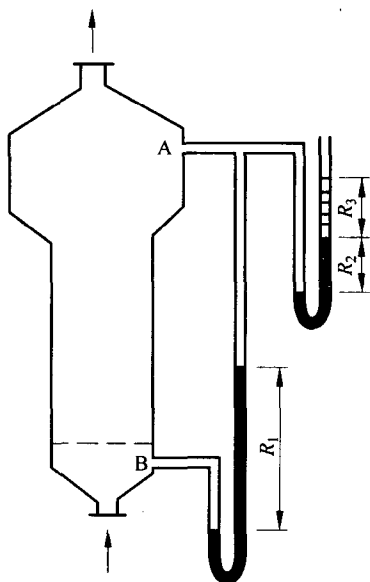
(2) 此处 p_A 反映的是气体的静压和动压(与流速相关)之和, p_B 反映的是气体的静压,故 $p_A - p_B$ 与气体流速之间有一定的关系。此即皮托管测流速的原理(见题 1-5 图)。

1-6 某流化床反应器上装有两个 U 形管压差计(见题 1-6 图),测得 $R_1 = 400 \text{ mm}$, $R_2 = 50 \text{ mm}$,指示液为水银,为防止水银蒸气向空间扩散,在上面的 U 形管与大气连通的玻璃管内注入一段水,其高度 $R_3 = 50 \text{ mm}$,试求 A, B 两处的表压。

解

$$\begin{aligned} p_A(\text{表}) &= \rho_K g R_3 + \rho_{\text{汞}} g R_2 \\ &= (1000 \times 0.05 + 13604 \times 0.05) \times 9.8 \\ &= 7156.1 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_B(\text{表}) &= p_A(\text{表}) + \rho_{\text{汞}} g R_1 \\
 &= 7\,156.1 + 13\,604 \times 9.8 \times 0.4 \\
 &= 60\,483.8 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$



题 1-6 图

分析

(1) 此处假设该流化床中流体介质为气体, 否则计算中设备内流体的密度不能忽略。

(2) 在很多设备上都会安装压差计(比如精馏塔塔顶和塔底之间), 通过压差计读数可以反映设备内流体流动状况, 因而可以间接反映出操作工况。

1-7 某气柜(见题 1-7 图)内径 9 m, 钟罩及其附件的总质量为 10 t, 忽略其浸在水中部分所受之浮力, 进入气柜的气速很低, 动能及阻力可以忽略, 求:

- (1) 入口气体压力(表压)为多大时, 才能使钟罩上浮?
- (2) 此时钟罩内外水位差 Δh (称“水封高”)为多少 mm?
- (3) 气柜内贮气量增加或减少时, 压力是否变化?

解

$$(1) p_i = \frac{W}{A} = \frac{10 \times 10^3 \times 9.81}{0.785 \times 9^2} = 1\,542.8 \text{ Pa(表压)}$$

即入口气体表压等于 1 542.8 Pa 时即可使钟罩上浮。