



面向21世纪课程辅导教材

食品工程原理

概念与习题解答

李云飞 葛克山 主编

中国农业大学出版社

面向 21 世纪课程辅导教材

食品工程原理

概念与习题解答

李云飞 葛克山 主编

中国农业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

食品工程原理概念与习题解答/李云飞,葛克山主编. —北京:中国农业大学出版社,2004. 8

ISBN 7-81066-776-9/TS·19

面向21世纪课程辅导教材

I. 食… II. ①李… ②葛… III. 食品工程学 IV. TS201.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第064714号

书 名 食品工程原理概念与习题解答

作 者 李云飞 葛克山 主编

策划编辑	刘 军 宋俊果	责任编辑	朱长玉
封面设计	郑 川	责任校对	陈 莹
出版发行	中国农业大学出版社		
社 址	北京市海淀区圆明园西路2号	邮政编码	100094
电 话	发行部 010-62731190,2620	读者服务部	010-62732336
	编辑部 010-62732617,2618	出 版 部	010-62733440
网 址	http://www.cau.edu.cn/caup	E-mail	caup @ public. bta. net. cn
经 销	新华书店		
印 刷	涿州市星河印刷有限公司		
版 次	2004年8月第1版	2004年8月第1次印刷	
规 格	787×980 16开本	19.25印张	352千字
印 数	1~3 050		
定 价	21.00元		

图书如有质量问题本社发行部负责调换

主 编 李云飞(上海交通大学)
葛克山(中国农业大学)

副主编 李 雁(华南农业大学)
黄阿根(扬州大学)
伍 军(北京农学院)

编 者 (按拼音顺序排列)
胡 萍(天津商学院)
蒋玉梅(甘肃农业大学)
李喜载(福建农林大学)
宋立华(上海交通大学)
张佰清(沈阳农业大学)
周颖越(上海水产大学)

主 审 徐文达(上海水产大学)

前 言

食品工程原理是关于食品工业现代化加工技术的原理,是国内外食品科学与工程专业学生必修的基础课程。该课程以流体力学、传热与传质学、热力学等理论为基础,涉及到许多复杂的工程设计与工艺计算问题。在一门课程中要掌握这么多基础理论和工程原理,无论对学生还是老师,都存在着如何教与学的最佳方法问题,在教材编写方面也存在着如何简明易懂、如何取舍又不失系统性的问题。虽然在我们编写的食品工程原理教材中,以大量例题帮助学生认识抽象原理,以食品工业实际问题帮助学生掌握工艺计算的方法,但学生对该课程仍然感到很难。为此,食品工程原理教材编写组在出版社的支持下,对教材中的基本概念和习题给予解答,并编入部分院校近年来的考研试题。希望能帮助学生对该课程的进一步理解。

本书是《食品工程原理》(李云飞、葛克山主编,2002年中国农业大学出版社出版)的配套教材,仍然由李云飞、葛克山组织编写与统稿,由上海水产大学徐文达教授主审。具体编写分工为李云飞第1章和第12章概念与习题解答,部分公式整理;葛克山第2章概念与习题解答,近年考研试题及部分公式整理;宋立华第3章概念与习题解答;李雁第4章概念与习题解答以及近年考研试题;张佰清第5章概念与习题解答;李喜载第6章概念与习题解答;黄阿根第7章概念与习题解答以及近年考研试题;蒋玉梅第8章概念与习题解答;周颖越第9章概念与习题解答;伍军第10章概念与习题解答;胡萍第11章概念与习题解答。由于本习题解是《食品工程原理》(李云飞、葛克山主编,2002年中国农业大学出版社出版)中的思考题和习题,因此,本习题解的参考文献与上述教材参考文献相同,故在本习题解后面不再列出。

参加本书编写的单位较多,统稿工作量较大,限于编者水平和时间,书中不足和错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2004年2月于上海交通大学

目 录

第 1 部分 基本概念与习题解答

1	流体力学基础	(1)
1.1	主要公式	(1)
1.2	基本概念解答	(9)
1.3	习题解答	(11)
2	传热	(24)
2.1	主要公式	(24)
2.2	基本概念解答	(35)
2.3	习题解答	(37)
3	食品冷冻技术	(70)
3.1	主要公式	(70)
3.2	基本概念解答	(76)
3.3	习题解答	(80)
4	颗粒与流体之间的相对流动	(84)
4.1	主要公式	(84)
4.2	基本概念解答	(94)
4.3	习题解答	(108)
5	液体搅拌与气液混合	(131)
5.1	主要公式	(131)
5.2	基本概念解答	(135)
5.3	习题解答	(139)
6	粉碎与筛分	(144)
6.1	主要公式	(144)
6.2	基本概念解答	(145)
6.3	习题解答	(149)
7	吸收与蒸馏	(151)
7.1	主要公式	(151)
7.2	基本概念解答	(163)

7.3 习题解答	(168)
8 液体吸附与离子交换	(189)
8.1 主要公式	(189)
8.2 基本概念解答	(196)
8.3 习题解答	(198)
9 浸出和萃取	(208)
9.1 主要公式	(208)
9.2 基本概念解答	(210)
9.3 习题解答	(212)
10 膜分离	(225)
10.1 主要公式	(225)
10.2 基本概念解答	(228)
10.3 习题解答	(230)
11 溶液浓缩	(233)
11.1 主要公式	(233)
11.2 基本概念解答	(241)
11.3 习题解答	(242)
12 食品干燥原理	(250)
12.1 主要公式	(250)
12.2 基本概念解答	(258)
12.3 习题解答	(260)

第2部分 部分院校近年考研试题

一、填空	(274)
二、选择题	(277)
三、判断题	(284)
四、计算题	(287)

第 1 部分 基本概念与习题解答

1 流体力学基础

1.1 主要公式

1.1.1 牛顿内摩擦定律

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dy} \quad (1-1)$$

式中： τ ——切应力(Pa)；

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度(s^{-1})；

μ ——流体动力黏度(Pa·s)。

1.1.2 稳定流动总能量方程式

单位质量流体的能量平衡式：

$$e_1 + p_1 v_1 + gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} + q + w = e_2 + p_2 v_2 + gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} \quad (\text{J/kg}) \quad (1-2a)$$

$$h_1 + gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} + q + w = h_2 + gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} \quad (\text{J/kg}) \quad (1-2b)$$

$$q + w = \Delta h + g\Delta Z + \Delta \frac{u^2}{2} \quad (\text{J/kg}) \quad (1-2c)$$

式中： Z ——某一液面距基准面的高度(m)；

u ——流体流动速度(m/s)；

e ——单位质量的流体所具有的内能(J/kg)；

p ——流体绝对压力(Pa)；

v ——流体的比体积(m^3/kg)；

ρ ——流体的密度(kg/m^3)；

w ——对单位质量流体所做的功(J/kg);

q ——对单位质量流体所加的热量(J/kg);

h ——单位质量的流体所具有的焓(J/kg)。

式中以下标1表示的项为体系进口截面上流体的能量;下标2表示的项为体系出口截面上流体的能量。

1.1.3 不可压缩理想流体的稳定流动与柏努利(Bernoulli)方程

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} \quad (\text{J/kg}) \quad (1-3a)$$

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} \quad (\text{m}) \quad (1-3b)$$

$$\rho g Z_1 + p_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} = \rho g Z_2 + p_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} \quad (\text{Pa}) \quad (1-3c)$$

式(1-3a)、式(1-3b)和式(1-3c)为不可压缩理想流体稳定流动能量方程的3种表达式,称为柏努利方程式。式中各项代表单位数量的流体所具有的位能、压力能和动能,式(1-3a)以每千克质量的流体所具有的能量来表示;式(1-3b)以每牛顿重量的流体所具有的能量来表示;式(1-3c)以每立方米体积的流体所具有的能量来表示。其中,式(1-3b)各项具有长度单位(m),在使用中将这3项分别称为位压头、静压头和动压头。

1.1.4 不可压缩实际流体的稳定流动

在流体输送中,分子之间的摩擦力将不可避免地造成机械能损失。根据能量守恒原理,损失的机械能转变为分子的内能。在流体流动计算中,我们称这部分内能为摩擦损失或水头损失。在体系与外界无热量交换情况下,不可压缩实际流体的稳定流动能量平衡方程为:

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + w = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + (e_2 - e_1) \quad (\text{J/kg}) \quad (1-4a)$$

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{(e_2 - e_1)}{g} \quad (\text{m}) \quad (1-4b)$$

或

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + w = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum L_t \quad (\text{J/kg}) \quad (1-4c)$$

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum h_t \quad (\text{m}) \quad (1-4d)$$

式中： $\sum L_t$ 和 $\sum h_t$ —— 分别称为单位质量和单位重量流体流动过程中的摩擦损失或水头损失； H 为输送设备的压头或扬程。

1.1.5 雷诺数 Re

雷诺数 Re 的表达式：

$$Re = \frac{lu\rho}{\mu} \quad (1-5)$$

式中： l —— 特征尺寸(m)；

u —— 流体平均速度(m/s)；

ρ —— 流体密度(kg/m³)；

μ —— 流体动力黏度(Pa·s)。

流态稳定性的判断标准为：

$Re > 4\,000$ 时，管中流动状态一般都为紊流；

$Re < 2\,000$ 时，管中流动状态都为层流；

$2\,000 < Re < 4\,000$ 时，管中流动状态可为层流，也可能为紊流，但紊流的可能性更大。水力直径 d_H 的表示式：

$$d_H = 4 \frac{A}{S} \quad (1-6)$$

式中： A —— 过流断面面积(m²)；

S —— 过流断面上流体与固体接触周长(m)。

异形管道雷诺数的表达式：

$$Re = \frac{d_H u \rho}{\mu} \quad (1-7)$$

1.1.6 圆管中的层流

管内流体速度表达式：

$$u = \frac{\Delta p}{4\mu l} (R^2 - r^2) \quad (1-8)$$

流量表达式：

$$Q = \frac{\pi \Delta p R^4}{8\mu l} = \frac{\pi \Delta p d^4}{128\mu l} \quad (1-9)$$

此式称为哈根-泊肃叶(Hagen-Poiseulle)定律。

式中： Δp —— 作用在圆管两端的压力差(Pa)；

l ——管长(m);
 r ——管内任意半径(m);
 R ——管半径(m)。

平均速度表达式:

$$\bar{u} = \frac{Q}{A} = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 \mu l \pi R^2} = \frac{\Delta p}{8 \mu l} R^2 \quad (1-10)$$

最大速度表达式:

$$u_{\max} = \frac{\Delta p R^2}{4 \mu l} = 2\bar{u} \quad (1-11)$$

1.1.7 流动损失

压强损失表达式:

$$\Delta p = \frac{8 \mu l \bar{u}}{R^2} = \frac{32 \mu l \bar{u}}{d^2} \quad (1-12)$$

水头损失表达式:

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (1-13)$$

根据达西公式,不论层流还是紊流,圆管中的沿程水头损失一概表示为:

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\bar{u}^2}{2g} \quad (1-14)$$

层流时沿程水头损失可表示:

$$h_f = \frac{64}{Re} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\bar{u}^2}{2g} \quad (1-15)$$

1.1.8 沿程阻力系数

尼古拉兹实验曲线可以分为5个阻力区域,每个阻力区域的范围、特点和计算 λ 的经验和半经验公式如下。

(1)层流区 当 $Re < 2320$ 时,不论相对粗糙度多少,其实验点均集中分布在直线I上,这条直线的方程即是 $\lambda = \frac{64}{Re}$ 。

(2)临界区 当 $2320 < Re < 4000$ 时,经验公式为:

$$\lambda = 0.0025 Re^{\frac{1}{3}} \quad (1-16)$$

(3)光滑管紊流区 当 $Re > 4\,000$ 以后,相对粗糙度 $\frac{\Delta}{d}$ 较小的几种管道的实验点都分布在直线 III 上,这条直线 III 的方程式称为布拉休斯公式:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (1-17)$$

(4)过渡区 $22.2 \left(\frac{d}{\Delta} \right)^{\frac{8}{7}} < Re < 597 \left(\frac{d}{\Delta} \right)^{\frac{9}{8}}$, 阻力系数公式:

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} \quad (1-18)$$

(5)粗糙管紊流区 $Re > 597 \left(\frac{d}{\Delta} \right)^{\frac{9}{8}}$, 阻力系数公式:

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0.25} \quad (1-19)$$

$$(1-20)$$

1.1.9 局部阻力系数

局部阻力损失有两种表示法:阻力系数法和当量长度法。

(1)阻力系数法 将局部阻力损失折合成管中平均速度水头的若干倍。

$$h_t = \zeta \frac{u^2}{2g} \quad (1-21)$$

(2)当量长度法 将局部阻力损失折合成具有相同直径、长度为 l_e 的沿程阻力损失。

$$h_t = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{u^2}{2g} \quad (1-22)$$

1.1.10 总水头损失

$$\sum h_t = \lambda \frac{(l + \sum l_e)}{d} \frac{u^2}{2g} \quad (1-23)$$

或

$$\sum h_t = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{u^2}{2g} \quad (1-24)$$

1.1.11 复杂管路

(1)并联管路 并联管路中各支管的阻力损失相等:

$$\sum L_{i,A-B} = \sum L_{i,1} = \sum L_{i,2} \quad (1-25)$$

主管中的流量等于各支管中流量之和:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (1-26)$$

(2)分支管路 各支管中,单位质量的流体在流动终了时的总能量及能量损失之和相等:

$$gZ_B + \frac{p_B}{\rho} + \frac{u_B^2}{2} + \sum L_{i,B} = gZ_C + \frac{p_C}{\rho} + \frac{u_C^2}{2} + \sum L_{i,C} \quad (1-27)$$

主管流量等于各支管流量之和:

$$Q_A = Q_B + Q_C \quad (1-28)$$

1.1.12 流体测量

(1)测速管 测速管又称皮托管(Pitot tube)。

管内任意点处的速度 u_r :

$$u_r = \sqrt{2(\rho_A - \rho)gR/\rho} \quad (1-29)$$

若被测量的流体是气体,由于 $\rho_A \gg \rho$,上式可简化为:

$$u_r = \sqrt{2\rho_A gR/\rho} \quad (1-30)$$

(2)孔板流量计 流量计算式:

$$Q = C_0 A_0 \sqrt{2gR(\rho_A - \rho)/\rho} \quad (1-31)$$

式中: C_0 ——流量系数,由教材图 1-23 确定;

A_0, A_1 ——分别为孔板孔口面积和管道截面面积(m^2);

Re ——流体流经管路的雷诺数。

(3)文丘里流量计 流量计算式:

$$Q = C_v A_0 \sqrt{2gR(\rho_A - \rho)/\rho} \quad (1-32)$$

式中: C_v ——文丘里流量计的流量系数,其值一般约为 0.98 或 0.99。

(4)转子流量计 流量计算式:

$$Q = C_R A_R \sqrt{\frac{2gV_f(\rho_f - \rho)}{A_f \rho}} \quad (1-33)$$

式中： A_f 、 V_f ——为转子的最大截面积和转子体积；

ρ_f 、 ρ ——转子的密度和流体的密度；

C_R ——转子流量计的流量系数，其值可由教材图1-26确定。

A_R ——玻璃管与转子之间的环隙面积。

1.1.13 水泵

(1) 压头或扬程

$$H = \Delta Z + \frac{p_D - p_a}{\rho g} + (\sum h_{TD} + \sum h_{IS}) \quad (\text{m}) \quad (1-34)$$

(2) 泵的功率和效率 单位时间内液体流经泵后实际所得到的功，以符号表示，即

$$P_e = \frac{HQ\rho g}{1\,000} \quad (1-35)$$

$$\eta = \frac{P_e}{P} = \frac{HQ\rho g}{1\,000 P} \quad (1-36)$$

式中： P_e ——有效功率(kW)；

P ——轴功率(kW)。

(3) 泵的安装高度 最大吸上真空高度：

$$H_{s\max} = \frac{p_a - p_v}{\rho g} \quad (1-37)$$

式中， p_v ——被输送液体在输送温度下的饱和蒸汽压(Pa)。

允许吸上真空高度 H_{sp} 。

$$H_{sp} < H_{s\max} \quad (1-38)$$

允许安装高度 Z_{sp} ：

$$Z_{sp} = H_{sp} - \frac{u_s^2}{2g} - \sum h_f \quad (\text{m}) \quad (1-39)$$

通常在泵的样本中查得的 H_{sp} 是根据大气压(98 kPa)=10 mH₂O，水温为20℃时得出的数值。若操作条件和上述不符，则 H_{sp} 必须按下式进行校正：

$$H'_{sp} = H_{sp} - 10 + H_a + \frac{p_v - p'_v}{\rho g} \quad (1-40)$$

式中： H_a ——泵工作点的大气压(m)；

p_v ——20℃下水的饱和蒸汽压(Pa)；

p'_v ——输送温度下水的饱和蒸汽压(Pa)。

泵的允许安装高度也可以用泵样本中的允许汽蚀余量 Δh_p 表示：

$$Z_{sp} = H_{s, \max} - \Delta h_p - \sum h_{fs} \quad (1-41)$$

为了安全起见,泵的实际安装高度还应比上述两种方法计算的允许值小0.5~1.0 m。

1.1.14 非牛顿流体

(1)宾哈姆流体的切应力与速度梯度的关系为：

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \frac{du}{dy} \quad (1-42)$$

式中： μ_p ——塑性黏度(Pa·s)；

τ_0 ——初始切应力(Pa)。

(2)假塑性流体(pseudoplastic fluid) 假塑性流体切应力与速度梯度的关系为：

$$\tau = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n, n < 1 \quad (1-43)$$

(3)胀塑性流体(dilatant fluid) 胀塑性流体切应力与速度梯度的关系为：

$$\tau = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n, n > 1 \quad (1-44)$$

式中： k ——稠度指数；

n ——流变指数；

k 和 n 的数值均由实验来确定。

1.1.15 气体输送原理与设备

(1)离心风机全压表达式

$$H_T = (p_2 - p_1) + \frac{u_2^2}{2} \rho \quad (1-45)$$

式中： $(p_2 - p_1)$ ——静风压(Pa)；

$\rho u_2^2/2$ ——动风压。

风机性能表上的风压,一般都是在 20°C , 101.3 kPa 的条件下用空气作介质测定的。该条件下空气的密度为 1.2 kg/m^3 。若实际的操作条件与上述的实验条件不同,则在选择离心通风机时,应将操作条件下的风压 H'_T 按下式换算为实验条件下的风压 H_T ,即

$$H_T = H'_T \frac{\rho}{\rho'} = H'_T \frac{1.2}{\rho'} \quad (1-46)$$

式中: ρ' ——操作条件下空气的密度(kg/m^3)。

(2)轴功率与效率 离心通风机的轴功率为:

$$N = \frac{H_T Q}{1\,000 \eta} \quad (1-47)$$

式中: N ——轴功率(kW);

H_T ——全风压(Pa);

Q ——风量(m^3/s);

η ——效率,因按全风压定出,因而又称全压效率。

1.2 基本概念解答

【1-1】粘性流体在静止时有无剪应力,理想流体在运动时有无剪应力?若流体在静止时无剪应力,是否意味着它们没有粘性?

答:由牛顿内摩擦定律可知,剪应力与速度梯度成正比,因此,粘性流体静止时无剪应力。又由理想流体的定义可知,没有粘性的流体为理想流体,因此,理想流体流动时仍无剪应力。流体在静止时无剪应力不等于没有粘性,只是没有表现出来。粘性是由流体本身决定的性质。

【1-2】粘性的物理本质是什么?为什么温度升高,气体黏度上升,而液体黏度下降?

答:粘性是流体流动时表现出来的重要性质,其物理本质是分子内聚力大小和分子热运动强度的宏观表现。流体流动时,由于分子间内聚力作用和分子热运动动量交换作用,使宏观移动流层(速度为 u)中的分子拉动临近流层中的分子,并使该临近流层以速度 $u - \Delta u$ 发生流动,内聚力越大或分子热运动动量交换越小,粘性越大(即 Δu 越小)。对于液体,当温度升高时,分子间的距离加大,同时热运动也加强,此时由于分子间距离加大而引起内聚力下降对粘性影响大于热运动带来的影响,

因此,液体黏度随温度升高而下降(即 Δu 加大)。对于气体,由于分子间距离远大于液体,因此,分子间内聚力对粘性影响处于次要位置。温度升高时,分子热运动引起动量交换加强,使黏度增加(即 Δu 减小)。

【1-3】雷诺数的物理意义是什么?

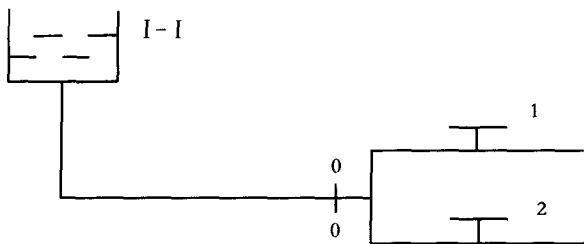
答:由雷诺数表达式可知, $Re = \frac{du\rho}{\mu}$ 是流体流动惯性力与粘滞力之比,其数值大小反映流体的流动状态。

【1-4】什么是水力光滑管?

答:设管壁绝对粗糙度为 Δ ,流体粘性底层厚度为 δ ,当 $\delta > \Delta$ 时,管壁凸凹表面似乎被镀上一层光滑的液膜,管壁粗糙度几乎不影响紊流核心。此时,称为水力光滑管。

【1-5】是否在任何管道中,流量增大则阻力损失就增大;流量减小则阻力损失就减小?为什么?

答:在某些管路中,流量与阻力损失并不是总成正比关系。如在分支管路中,如图所示,当阀门1和阀门2全开时,流量最大。如果此时关小阀门1,这时支路1流量减少,而局部阻力增加,如果支路沿程阻力可以忽略,则对支路1而言,是流量减少,而阻力损失增加。如果主管路的阻力损失与支路的阻力损失相比很小,则主管路的阻力损失可以忽略不计时,关小阀门1不影响支路2的流量,因为I-I面和0-0面能量基本相同,近似为常数,支路2阀门未改变,因此流量也不会改变。但此时整个分支管路流量减少了,阻力却增加了。



【1-6】刚安装好的一台离心泵,启动后出口阀门已经开至最大,但不见水流出,试分析原因并采取措施使泵正常运行。

答:出现此类问题的可能原因如下:

(1)没有向水泵内灌引水或没有灌满引水。从吸水口到离心泵,水是在吸水口处与离心泵进口处两处压力差作用下被吸入离心泵,压力差的大小主要取决于离心泵进口处的绝对压力。为了产生足够的压力差,启动前应向水泵内灌足引水,排