

高校经典教材同步辅导

配套夏清、陈常贵主编 姚玉英主审的《化工原理》

九章丛书

# 化工原理

天大修订版

## 辅导及习题全解

(教材上下册合订本配套用书)

Unit Operations of  
Chemical Engineering

主编 / 杨富云 孙怀东

编写 / 九章系列课题组

人民邮电出版社

高校经典教材同步辅导

# 化工原理辅导及习题全解

天大修订版

(教材上下册合订本配套用书)

人民邮电出版社

图书在版编目(CIP)数据

高校经典教材同步辅导·化工原理(天大修订版)/杨富云,孙怀东主编. —北京:人民日报出版社,2004.4

ISBN 7-80153-865-X

I. 高… II. ①杨…②孙… III. 高校—教学参考资料

IV. G624

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 030531 号

高校经典教材同步辅导·化工原理(天大修订版)

---

主 编: 杨富云 孙怀东

责任编辑: 安 申

封面设计: 伍克润

---

出版发行: 人民日报出版社(北京金台西路2号/邮编:100733)

经 销: 新华书店

印 刷: 北京顺天意印刷有限公司

---

字 数: 457 千字

开 本: 787×960 1/16

印 张: 31.75

印 数: 3000

印 次: 2005 年 8 月第 1 次印刷

---

书 号: ISBN 7-80153-865-X/G·479

定 价: 36.80 元(全五册·128.00 元)

# 前 言

化工原理是高等院校化工类各专业必修的一门主干课程,它属于技术基础课,在高等学校的教学计划中起到衔接自然学科和应用学科的作用。

本书是配合天津大学夏清、陈常贵主编,姚玉英主审的《化工原理》(修订版,天津大学出版社)而编写的教材辅导书,旨在帮助读者深刻理解化工原理教材的重点内容,牢固掌握基础知识和基本原理,培养正确的思维方法,以及提高读者的知识水平和应试能力。

本书各章主要内容如下:

**一、基本要求**——结合理工类高校化工原理考研大纲要求,分别对各章知识点做了简要概括,使读者在学习过程中做到目标明确,有的放矢。

**二、主要考点分析**——将各章节的内容进行了简明扼要的叙述、归纳和总结,突出必须掌握和理解的核心内容,以加深读者对其的理解。

**三、典型例题精解**——本部分精选了化工原理课程中具有代表性的经典例题,并辅以分析。希望读者通过对这些例题的学习后,能够达到举一反三,触类旁通。

**四、课后习题全解**——本部分依据天大版的《化工原理》的教材,对各章习题做出详细解答,本书除了有传统习题的解题过程外,还有以下特点:

1. **知识点窍**:运用公式、定理及定义来点明知识点;

2. **逻辑推理**:阐述习题的解题过程;

3. **解题过程**:概念清晰、步骤完整、数据准确、附图齐全。

把“知识点窍”、“逻辑推理”、“解题过程”串起来,做到融会贯通,最后给出教材课后习题的答案,在解题思路和解题技巧上进行精练分析和引导,巩固所学,达到举一反三的效果。

**五、自测题**——学习上的努力取决于个人的努力和自我鞭策,本部分各题选自清华大学主编的化工原理试题库和各名校历年考研试题,主要供学生自我检测之用。

本书在编写过程中,主要参考了匡国柱主编的《化工原理学习指导》、丛德滋等主编的《化工原理详解与应用》及姚玉英等主编的《化工原理学习指导》等,在此深表感谢!

由于编者水平有限及编写时间仓促,不妥之处在所难免,希望广大读者不吝批评指正。

编者

2005年6月

# 目 录

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 绪 论 .....                 | 1   |
| 基本要求 .....                | 1   |
| 主要考点分析 .....              | 1   |
| 典型例题精解 .....              | 1   |
| 课后习题详解 .....              | 3   |
| 第一章 流体流动 .....            | 6   |
| 基本要求 .....                | 6   |
| 主要考点分析 .....              | 6   |
| 典型例题精解 .....              | 13  |
| 课后习题详解 .....              | 34  |
| 自测题 .....                 | 55  |
| 自测题答案 .....               | 60  |
| 第二章 流体输送机械 .....          | 63  |
| 基本要求 .....                | 63  |
| 主要考点分析 .....              | 63  |
| 典型例题精解 .....              | 69  |
| 课后习题详解 .....              | 82  |
| 自测题 .....                 | 91  |
| 自测题答案 .....               | 96  |
| 第三章 非均相物系的分离和固体的流态化 ..... | 101 |
| 基本要求 .....                | 101 |

|                      |            |
|----------------------|------------|
| 主要考点分析 .....         | 101        |
| 典型例题精解 .....         | 110        |
| 课后习题详解 .....         | 123        |
| 自测题 .....            | 132        |
| 自测题答案 .....          | 136        |
| <b>第四章 传 热 .....</b> | <b>138</b> |
| 基本要求 .....           | 138        |
| 主要考点分析 .....         | 138        |
| 典型例题精解 .....         | 148        |
| 课后习题详解 .....         | 170        |
| 自测题 .....            | 186        |
| 自测题答案 .....          | 188        |
| <b>第五章 蒸 发 .....</b> | <b>191</b> |
| 基本要求 .....           | 191        |
| 主要考点分析 .....         | 191        |
| 典型例题精解 .....         | 194        |
| 课后习题详解 .....         | 201        |
| 自测题 .....            | 206        |
| 自测题答案 .....          | 207        |
| <b>第六章 蒸 馏 .....</b> | <b>210</b> |
| 基本要求 .....           | 210        |
| 主要考点分析 .....         | 210        |
| 典型例题精解 .....         | 224        |
| 课后习题详解 .....         | 245        |
| 自测题 .....            | 259        |
| 自测题答案 .....          | 265        |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| <b>第七章 吸 收 .....</b>      | <b>272</b> |
| 基本要求 .....                | 272        |
| 主要考点分析 .....              | 273        |
| 典型例题精解 .....              | 287        |
| 课后习题详解 .....              | 307        |
| 自测题 .....                 | 319        |
| 自测题答案 .....               | 324        |
| <b>第八章 蒸馏和吸收塔设备 .....</b> | <b>334</b> |
| 基本要求 .....                | 334        |
| 主要考点分析 .....              | 334        |
| 典型例题精解 .....              | 343        |
| <b>第九章 萃 取 .....</b>      | <b>354</b> |
| 基本要求 .....                | 354        |
| 主要考点分析 .....              | 354        |
| 典型例题精解 .....              | 360        |
| 课后习题详解 .....              | 379        |
| 自测题 .....                 | 388        |
| 自测题答案 .....               | 394        |
| <b>第十章 干 燥 .....</b>      | <b>400</b> |
| 基本要求 .....                | 400        |
| 主要考点分析 .....              | 400        |
| 典型例题精解 .....              | 407        |
| 课后习题详解 .....              | 434        |
| 自测题 .....                 | 445        |
| 自测题答案 .....               | 450        |

|                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| <b>附录一 化工原理实验 .....</b>     | <b>462</b>     |
| 实验一 离心泵性能参数的测定 .....        | 462            |
| 实验二 恒压过滤常数的测定 .....         | 465            |
| 实验三 填料精馏塔等板高度的测定 .....      | 469            |
| 实验四 流化干燥速率曲线的测定 .....       | 472            |
| <br><b>附录二 考研综合试题 .....</b> | <br><b>475</b> |
| 攻读硕士学位研究生化工原理全真模拟卷(A).....  | 475            |
| 攻读硕士学位研究生化工原理全真模拟卷(B).....  | 483            |
| 攻读硕士学位研究生化工原理全真模拟卷(C).....  | 491            |

# 绪 论

## 基本要求

通过学习,了解各单元操作之间的共性,理解动量传递,质量传递,热量传递的类似性和内在联系。掌握单位制及单位换算的基本知识。理解对选定系统作物料衡算和能量衡算的思想。

## 主要考点分析

### (一)化工中国际制基本单位有:

| 物理量 | SI 单位  | cgm 单位  | 工程制单位                                            |
|-----|--------|---------|--------------------------------------------------|
| 长度  | m(米)   | cm(厘米)  | m(米)                                             |
| 质量  | kg(千克) | g(克)    | kgf · s <sup>2</sup> /m(千克力 · 秒 <sup>2</sup> /米) |
| 时间  | s(秒)   | s(秒)    | s(秒)                                             |
| 温度  | K(开)   | ℃或 K(开) | ℃                                                |

### (二)几个非常有用的单位换算

$$1 \text{ 千卡} = 427 \text{ 千克(力) · 米} = 4.187 \text{ kJ}$$

$$\text{N} \cdot \text{m} = \text{J(焦耳)} \quad \text{J/s} = \text{W(瓦)}$$

$$\text{N/m}^2 = \text{Pa(帕斯卡)}$$

$$1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9.81 \text{ N} \quad \text{这个公式是工程制单位与 SI 制单位换算的桥梁}$$

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 760 \text{ mmHg}$$

## 典型例题精解

**【例 0—1】** 水以 150kg/h 的流率,食盐以 30kg/h 的流率加入如图 0—1 所示的搅拌槽中,制成溶液后,以 120kg/h 的流率离开容器。由于搅拌充分,槽内浓度各处均匀。开始时槽内预先盛有新鲜水 100kg。试计算 1 小时后从槽内流出的溶液浓度(以

食盐的质量分数表示)。

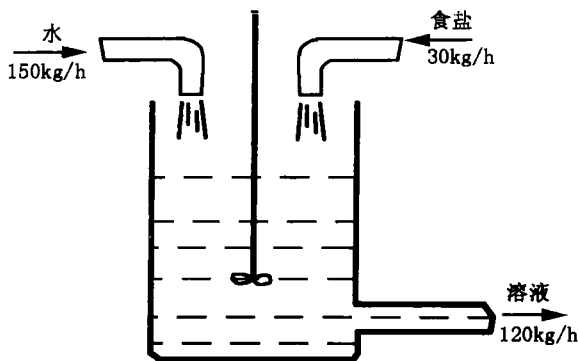


图 0-1 搅拌槽的质量衡算

解:此题为非稳态系统的物料衡算,关键要选定所列衡算的系统。

对总流股衡算

$$W_2 - W_1 + \frac{dM}{d\theta} = 0$$

即

$$120 - (150 + 30) + \frac{dM}{d\theta} = 0$$

$$\frac{dM}{d\theta} = 60 \text{ kg/h}$$

积分得

$$M = 60\theta + M_0 \text{ (kg)}$$

$$\theta = 0 \text{ 时, } M = M_0 = 100 \text{ kg}$$

对食盐组分作物料衡算

$$W_2 a_2 - W_1 + \frac{d(Ma)}{d\theta} = 0$$

$a_2 = a$ , 流出液盐浓度等于混和后混和液盐浓度

$$120a - 30 + M \frac{da}{d\theta} + a \frac{dM}{d\theta} = 0$$

把  $M = 60\theta + 100$  代入上式 即有

$$120a - 30 + (60\theta + 100) \frac{da}{d\theta} + 60a = 0$$

分离变量并积分

$$\int_0^\theta \frac{d\theta}{60\theta + 100} = - \int_0^a \frac{da}{180a - 30}$$

$$a = \frac{1}{6} \left[ 1 - \left( \frac{10}{60 + 100} \right)^3 \right]$$

$\theta = 1\text{h}$  代入, 得槽内流出的溶液浓度

$$a = 0.126$$

**【例 0-2】** 液体越过平顶堰上的液面高度可用以下经验式计算:

$$h_{ow} = 0.48 \left( \frac{q_v}{l_w} \right)^{\frac{2}{3}}$$

式中  $h_{ow}$ ——堰上液面高度, in;

$q_v$ ——液面体积流量, gal/min;

$l_w$ ——堰长, in。

试求流量为  $0.05\text{m}^3/\text{s}$  的液体越过长度为  $2\text{m}$  的平顶堰, 堰上液面高度为多少米?

**解:** 此题考察经验关系式之间的单位换算

利用以下关系

$$1\text{m} = 39.37\text{in}$$

$$1\text{m}^3 = 264.2\text{gal}$$

$$1\text{min} = 60\text{s}$$

把所求的各单位化为经验式中的单位, 代入有

$$q_v = 0.05 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0.05 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \times \frac{264.2 \left( \frac{\text{gal}}{\text{m}^3} \right)}{\frac{1}{60} \left( \frac{\text{min}}{\text{s}} \right)} = 792.6 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$$

$$l_w = 2\text{m} = 2(\text{m}) \times 39.37 \left( \frac{\text{in}}{\text{m}} \right) = 78.74\text{in}$$

$$\begin{aligned} h_{ow} &= 0.48 \left( \frac{q_v}{l_w} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.48 \times \left( \frac{792.6}{78.74} \right)^{\frac{2}{3}} = 2.24\text{in} \\ &= 2.24(\text{in}) \frac{1}{39.37} \left( \frac{\text{m}}{\text{in}} \right) = 0.057\text{m} \end{aligned}$$

## 课后习题详解

**【0-1】** 热空气与冷水间的总传系数  $K$  值均为  $42.99\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ , 试从基本单位换算开始, 将  $K$  值的单位改为  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

**解:**  $1\text{h} = 3600\text{s}$ ;  $1\text{kcal} = 4.2 \times 10^3\text{kJ}$ ;  $\text{J}/\text{S} = \text{W}$  (瓦特)

进行单位换算:  $42.99 \times 4.2 \times 10^3 / 3600 = 50\text{J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) = 50\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

**【0-2】** 密度  $\rho$  是单位体积物质具有的质量。在以下两种单位制中,物质密度的单位分别为:

SI  $\text{kg}/\text{m}^3$

米制重力单位  $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$

常温下水的密度为  $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ,试从基本单位换算开始,将该值换算为米制重力单位的数值。

**解:**米制单位中,1 千克物体所受重力为  $1\text{kgf}$ ,且  $1\text{kgf}=9.8\text{N}$

$$10^3\text{kg}/\text{m}^3 = 10^3\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 = \left(\frac{10^3}{9.8}\right)\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 = 102\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

**【0-3】** 甲烷的饱和蒸气压与温度的关系符合下列经验公式:

$$\lg p = 6.421 - \frac{352}{t + 261}$$

式中  $p$ ——饱和蒸气压,mmHg;

$t$ ——温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

今需将式中  $p$  的单位改为 Pa,温度单位改为 K,试对该式加以变换。

**解:**因为  $1.013 \times 10^5\text{Pa} = 760\text{mmHg}$ ,

所以  $1\text{Pa} = 0.00755\text{mmHg}$ ,  $t(\text{摄氏温度}) + 273 = T(\text{开氏温度})$

将  $t, p$  换成所要求单位即有下式

$$\lg\left(\frac{1}{0.0075}p\right) = 6.421 - \frac{352}{T - 273 + 261}$$

$$\lg p - \lg 0.0075 = 6.421 - 352/(T - 12)$$

$$\lg p = 8.546 - 352/(T - 12)$$

**【0-4】** 将 A, B, C, D 四种组分各为 0.25(摩尔分数,下同)的某混合溶液,以  $1000\text{kmol}/\text{h}$  的流量送入精馏塔内分离,得到塔顶与塔釜两股产品,进料中全部 A 组分、96% B 组分及 4% C 组分存于塔顶产品中;全部 D 组分存于塔釜产品中。试计算塔顶和塔釜产品的流量及其组成。

**解:**由题可知,考察物料衡算知识。

进料:  $W_A = W_B = W_C = W_D = 10^3 \times 0.25 = 250\text{kmol}/\text{h}$

塔顶: A  $250\text{kmol}/\text{h}$

B  $250 \times 96\% = 240\text{kmol}/\text{h}$

C  $250 \times 4\% = 10\text{kmol}/\text{h}$

塔釜: D  $250\text{kmol}/\text{h}$

B  $250(\text{进料}) - 240(\text{塔顶}) = 10\text{kmol}/\text{h}$

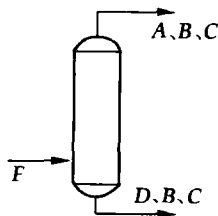


图 0-2

$$C_w \quad 250(\text{进料}) - 10(\text{塔顶}) = 240 \text{ kmol/h}$$

$$\text{塔顶的物料流量 } W = A + B_D + C_D = 500 \text{ kmol/h}$$

$$x_{AD} = \frac{250}{500} = 0.5, x_{DB} = \frac{240}{500} = 0.48, x_{DC} = \frac{10}{250} = 0.02$$

$$\text{塔釜的物料流量 } W = D + B_w + C_w = 500 \text{ kmol/h}$$

$$x_{WB} = 10/500 = 0.02, x_{WC} = 240/500 = 0.48, x_{WD} = 250/500 = 0.5$$

**【0-5】** 将密度为  $810 \text{ kg/m}^3$  的油与密度为  $1000 \text{ kg/m}^3$  的水充分混合成为均匀的乳浊液,测得乳浊液的密度为  $950 \text{ kg/m}^3$ 。试求乳液中油的质量分数。水和油混合后体积无变化。

**解:** 设加入油的体积  $V_1$ , 水的体积为  $V_2$

$$\text{总质量衡算:} \quad (V_1 + V_2) \times 950 = 810V_1 + 1000V_2$$

$$\text{所以} \quad V_1 = \frac{5}{14} V_2$$

$$\text{对油衡算: } 810V_1 \times 100\% = (V_1 + V_2) \cdot 950 \cdot x$$

$$x = \frac{810}{(V_1 + V_2)950} = \frac{810 \times \frac{5}{14} V_2}{(V_2 + \frac{5}{14} V_2) \times 950} = 0.2244$$

**【0-6】** 每小时将  $200 \text{ kg}$  过热氨气(压强为  $1200 \text{ kPa}$ )从  $95^\circ\text{C}$  冷却、冷凝为饱和液氨。已知冷凝温度为  $30^\circ\text{C}$ 。采用冷冻盐水为冷凝、冷却剂,盐水于  $2^\circ\text{C}$  下进入冷凝、冷却器,离开时为  $10^\circ\text{C}$ 。求每小时盐水的用量。

热损失可以忽略不计

数据:

$95^\circ\text{C}$  过热氨气的焓,  $\text{kJ/kg}$      $1647$

$30^\circ\text{C}$  饱和液氨的焓,  $\text{kJ/kg}$      $323$

$2^\circ\text{C}$  盐水的焓,  $\text{kJ/kg}$          $6.8$

$10^\circ\text{C}$  盐水的焓,  $\text{kJ/kg}$          $34$

**解:** 由于不计热损失,氨冷凝所放出热量等于盐水吸收的热量。

$$m_{\text{氨}}(H_1 - H_2) = m_{\text{盐}}(h_1 - h_2)$$

$$\text{已知} \quad m_{\text{氨}} = 200 \text{ kg}, H_1 = 1647 \text{ kJ/kg}, H_2 = 323 \text{ kJ/kg}, h_1 = 34 \text{ kJ/kg}, h_2 = 6.8 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{所以} \quad m_{\text{盐}} = \frac{200 \times (1647 - 323)}{34 - 6.8} = 9735 \text{ kg/h}$$

# 第一章 流体流动

## 基本要求

通过本章的学习,了解流体平衡和运动的基本规律,熟练掌握静力学方程式、连续性方程式、机械能衡算方程式,并能在此基础能较好的解决相关问题,比如管路计算、输送设备功率计算等。

### 一、掌握以下内容

1. 流体的主要物性(密度、粘度)数据求取及换算;
2. 流体静力学基本方程式的应用;
3. 连续性方程、柏努利方程的物理意义、适用条件、解题要点;
4. 两种流型的比较和工程处理方法;
5. 流动阻力的计算;
6. 管路计算和流量(流速)测量。

### 二、了解以下内容

1. 牛顿型和非牛顿流体的流变特性以及边界层的相关概念;
2. 管路的构成管件及阀门的作用;
3. 因次分析的方法。

## 主要考点分析

### 一、流体静力学

#### 1. 压强( $p$ )的表示

**绝压:**以绝对真空为基准测得的压强。

**表压:**以当地大气压为基准测得的压强,如表压为负值称为真空度。

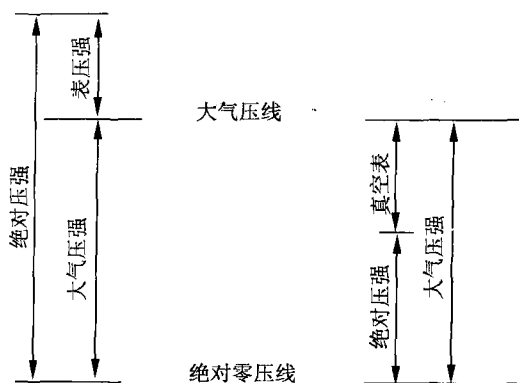


图 1—1 大气压强、绝对压强和表压强  
(或真空度)间的关系

重要公式: 表压 = 绝对压强 - 大气压; 真空度 = 大气压 - 绝对压强。

## 2. 静力学基本方程

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

或  $gz + \frac{p}{\rho} = \text{const}(\text{常数})$

或  $p = p_0 + \rho gh$

**适用条件:** 静止的, 连通着的同一种连续流体, 该式表达了重力场中静止的连续不可压缩流体内部压强的变化规律。

应用静力学方程时要注意选取**等压面**。等压面是流体中压力相等的水平面, 等压面必须同时满足静止的、连续的同一种流体、处于同一水平面这三个条件, 缺一不可。

静力学基本方程也可用于压力变化幅度不大的气体。

以流体静力学基本方程式为依据可设计出各种液柱压差计、液位计, 可进行液封高度计算, 根据  $\left(gz + \frac{p}{\rho}\right)$  的大小判断流向。但需特别注意, U 形管压差计读数反映的是两测量点位能和静压能两项和的差值。

## 二、流体动力学

### 1. 流量与流速

体积流量  $V(\text{m}^3/\text{s})$ , 质量流量  $w(\text{kg}/\text{s})$ , 平均流速  $u(\text{m}/\text{s})$ , 质量流速  $G(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$

s), 其变换关系为:

$$V = uA, w = V\rho = uA\rho, G = \frac{w}{A} = \frac{V\rho}{A} = u\rho$$

其中,  $A$  为管道截面积。

一般管道截面为圆形, 以  $d$  表示其内径, 则有  $u = \frac{V}{\frac{\pi}{4}d^2}$ , 于是  $d = \sqrt{\frac{4V}{\pi u}}$ 。如已知流

速可通过这个公式求解管道的直径  $d$ , 但注意管道的直径  $d$  通常是标准尺寸。

## 2. 稳态流动与非稳态流动

在流动系统中, 流体的流速、密度、压力等物理量仅是位置的函数, 不随时间改变, 则称此系统为稳态流动系统, 化工生产多属连续稳态流动。反之, 若以上参数不仅随位置变化、而且随时间而变, 则称该流动为非稳态流动。

## 3. 稳态流动时的连续性方程

$$u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2 = \cdots = uA\rho = w = \text{常数}$$

对不可压缩流体,  $\rho$  为常数。有

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 = \cdots = uA = V = \text{常数, 圆管内有 } u_1 d_1^2 = u_2 d_2^2$$

## 4. 柏努利方程

柏努利方程是流体流动中机械能守恒和转化原理的体现, 它描述了流入和流出一个系统的流体量和流动参数之间的定量关系。

推导柏努利方程式的思路是: 从解决流体输送问题的实际需要出发, 采取逐渐简化的方法, 即进行流动系统的总能量衡算(包括热能和内能)、流动系统的机械能衡算(消去热能和内能)、不可压缩流体定态流动的机械能衡算。

(1) 具有外功加入、不可压缩粘性流体定态流动的柏努利方程式

以  $1\text{kg}$  流体为基准, 不可压缩粘性流体定态流经输送系统的柏努利方程式为

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + W_e = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum h_f$$

$$\text{或 } W_e = g\Delta z + \frac{\Delta p}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + \sum h_f$$

式中的  $W_e$  为输送机械对  $1\text{kg}$  流体所作的有效功, 或  $1\text{kg}$  流体从输送机械获得的有效能量。式中各项单位均为  $\text{J/kg}$ 。

当流体不流动时,  $u = 0$ ,  $\sum h_f = 0$ , 也不需要加入外功, 于是方程变为

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

可见,流体静力学基本方程式为柏努利方程式的一个特例。

理想流体不产生阻力  $\sum h_f = 0$ ,若无外加功时,  $W_e = 0$ ,柏努利方程变为

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2}$$

上式表达了流体的位能,静压能,动能之间有相互转换与守恒关系。

## (2) 实际流体的柏努利方程

实际流体在流动时存在流动阻力。为了克服流动阻力,系统必须消耗掉一部分机械能。消耗的机械能可分别表示为阻力  $\sum R(\text{J/kg})$ 、压头损失  $\sum h_f(\text{m})$ 、压力降  $\Delta p_f(\text{Pa})$  等形式。导出的方程相应也有多种形式:

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + W_e = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum R(\text{J/kg})$$

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H_e = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum h_f(\text{m})$$

$$\rho g z_1 + p_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + \rho W_e = \rho g z_2 + p_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + \rho \sum R(\text{N/m}^2)$$

式中:  $W_e$ 、 $H_e$ 、 $\rho W_e$  分别是流体输送机械对 1kg 质量流体、每牛顿流体、每  $\text{m}^3$  流体所做的功。

## 5. 柏努利方程使用时注意的问题

- (1) 应是定常态流动的连续流体;
- (2) 各物理量采用统一的单位制计算,对于压力要么都为绝压,要么都为表压;
- (3) 对于可压缩流体,  $\frac{p_1 - p_2}{p_1} < 20\%$  时,也可应用;

(4) 要选择恰当的控制体,即截面的选取,应包含未知变量,且有尽可能多的已知量,一般都与流动方向垂直。

## 6. 机械能

有效功率  $N_e = W_e \cdot w$ ,

其中,  $W_e$  是流体输送机械对 1kg 质量流体所做的功,  $w$  是流体的质量流量。

若输送机械的效率为  $\eta$ ,则泵的轴功率  $N = \frac{N_e}{\eta}$ 。