



全国高职高专教育“十一五”规划教材

化工原理学习指导

王艳国 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

化工原理学习指导

王艳国 主编

王玉玲 杨 宇 王晓力 副主编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书为高教版高职高专《化工原理》教材的配套学习用书。全书共八章,包括流体流动与输送设备、分离、传热、蒸发、气体吸收、蒸馏、干燥、液液萃取。每章都分为重点内容提要、典型例题选解与案例分析、自测与练习(含参考答案)三大部分。

本书可作为化工技术类专业及相关专业高职高专的化工原理课程学习辅导性用书,也可供相关企业培训及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理学习指导 / 王艳国主编. —北京:高等教育出版社, 2009.8

ISBN 978-7-04-027484-4

I. 化… II. 王… III. 化工原理—高等学校—教学参考资料 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 110889 号

策划编辑 周先海

版式设计 马敬茹

责任编辑 周先海

责任校对 王效珍

封面设计 张 楠

责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京未来科学技术研究所
有限责任公司印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 9.5
字 数 210 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2009 年 8 月第 1 版
印 次 2009 年 8 月第 1 次印刷
定 价 16.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 27484-00

前 言

本书为高职高专《化工原理》的配套学习用书。可作为化工类及相关专业(包括化工、石油、生物工程、食品工程、制药、材料、冶金、环保等)的化工原理课程学生学习辅导性用书。

本书在编写过程中,力争保证系统完整,并做到深入浅出,注重理论联系实际,突出工程观点和研究方法,同时反映出新技术。全书共八章,包括流体流动与输送设备、分离、传热、蒸发、气体吸收、蒸馏、干燥、液液萃取。每章都分为重点内容提要、典型例题选解与案例分析、自测与练习(含参考答案)三大部分。其中,案例分析全部取材于相关实际石化企业,具有很强的实践代表性;自测与练习包含填空题、判断题、选择题、计算题等多种题型,且计算题配有相应的解题过程,能很好地训练巩固学生的相关知识。

本书由王艳国担任主编并统稿,王玉玲、杨宇、王晓力担任副主编,参加编写的还有陈则立、冯艳文、杨夕强等。在编写过程中,得到了高等教育出版社相关同志的热情支持和帮助,在此向他们表示衷心的感谢。

由于时间仓促并编者水平所限,书中错误和不妥之处在所难免,还请广大读者批评指正。

编者
2009.6

目 录

第一章 流体流动与输送机械	1
重点内容提要	1
典型例题选解与案例分析	4
自测与练习	11
自测与练习参考答案	14
第二章 非均相物系分离	17
重点内容提要	17
典型例题选解与案例分析	19
自测与练习	25
自测与练习参考答案	29
第三章 传热	34
重点内容提要	34
典型例题选解与案例分析	36
自测与练习	45
自测与练习参考答案	49
第四章 蒸发	54
重点内容提要	54
典型例题选解与案例分析	56
自测与练习	62
自测与练习参考答案	65
第五章 吸收	70
重点内容提要	70
典型例题选解与案例分析	72
自测与练习	80
自测与练习参考答案	84
第六章 蒸馏、精馏	89
重点内容提要	89
典型例题选解与案例分析	91
自测与练习	100
自测与练习参考答案	103
第七章 干燥	106
重点内容提要	106
典型例题选解与案例分析	108

自测与练习	116
自测与练习参考答案	120
第八章 液液萃取	127
重点内容提要	127
典型例题选解与案例分析	129
自测与练习	135
自测与练习参考答案	139
主要参考资料	143

第一章 流体流动与输送机械

【重点内容提要】

1. 流体的密度

气体的密度随压强和温度的变化而变化,由相关手册中查取密度时,应注意其标明的状态,若操作状态不同则需按理想气体状态方程进行换算。

$$\rho = \frac{pM}{RT}$$

在上式使用过程中,要注意物理量(p 、 T)及常数(R)的单位,压强 p 只能用绝对压强。

2. 流体的压强

(1) 压强的单位

- ① 按压强的定义,其单位为 N/m^2 或 Pa 等;
- ② 以流体柱高度表示,如用米水柱或毫米汞柱等;
- ③ 以大气压表示,如用标准大气压(atm)、工程大气压(at)。

(2) 压强的表示方法

$$\begin{aligned}\text{表压} &= \text{绝对压强} - \text{大气压强} \\ \text{真空度} &= \text{大气压强} - \text{绝对压强}\end{aligned}$$

3. 流体静力学基本方程

(1) 压强形式

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2)$$

上式表明:① 在重力场中,静止流体内部任一点的静压强与该点所在的垂直位置及流体的密度有关,而与该点所在的水平位置及容器的形状无关。

② 在静止的、连续的同种液体内部,处于同一水平面上各点的压强处处相等。液面上方压强变化时,液体内部各点的压强也将发生相应的变化。

(2) 能量形式

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g$$

静力学基本方程反映了静止流体内部能量守恒与转换的关系,在同一静止流体中,处在不同位置的位能和静压能各不相同,二者可以相互转换,但两项能量总和恒为常量。

4. U形管压差计

依据静力学基本原理制成的 U 形管压差计是应用较广泛的液柱压差计,利用它可以测量流体中两点间的压强差,其测压原理为

$$p_1 - p_2 = (\rho_0 - \rho) g R$$

5. 流体的流量与流速

(1) 质量流量与体积流量之间的关系 $q_m = q_v \rho$

(2) 质量流速与平均流速之间的关系 $G = \rho u$

(3) 流量与流速的关系 $q_v = uA$

$$q_m = GA = \rho u A$$

这几组关系在实际应用中经常遇到。

6. 流体的连续性方程

流体在流动系统中作稳定流动时

$$q_{m1} = q_{m2} \quad \text{或} \quad u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2$$

对于不可压缩性流体, $\rho = \text{常数}$, 则

$$\begin{aligned} q_{v1} &= q_{v2} \\ u_1 A_1 &= u_2 A_2 \end{aligned}$$

上式表明:不可压缩性流体在流动系统中作稳定流动时,流速 u 与流动截面积 A 成反比。

对于圆形管道

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2$$

即不可压缩性流体在圆形管道中任意截面的流速与管内径的平方成反比。

7. 伯努利方程

(1) 伯努利方程

以单位质量流体为基准:

$$gz_1 + \frac{1}{2}u_1^2 + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gz_2 + \frac{1}{2}u_2^2 + \frac{p_2}{\rho} + \sum W_f \quad \text{单位为 J/kg}$$

以单位重量流体为基准:

$$z_1 + \frac{1}{2g}u_1^2 + \frac{p_1}{\rho g} + H_e = z_2 + \frac{1}{2g}u_2^2 + \frac{p_2}{\rho g} + \sum H_f \quad \text{单位为 m}$$

(2) 应用伯努利方程时需注意的问题

① 截面的选取 所选取的截面应与流体的流动方向相垂直,并且两截面间流体应是稳定连续流动。截面宜选在已知量多、计算方便处。截面的物理量均取该截面上的平均值。

② 基准水平面的选取 基准水平面可以任意选取,但必须与地面平行。为计算方便,通常选取两截面中位置较低的截面为基准水平面。若截面不是水平面,而是垂直于地面,则基准面应选过截面中心线的水平面。

③ 计算中要注意各物理量的单位保持一致,对于压强还应注意表示方法一致。

8. 流体的流动型态与雷诺数

(1) 流体的流动型态:层流与湍流

(2) 流体流动型态的判别依据——雷诺数

$$Re = \frac{du\rho}{\mu}$$

① 当 $Re \leq 2000$ 时,流动为层流,此区称为层流区;

② 当 $Re \geq 4000$ 时,流动为湍流,此区称为湍流区;

③ 当 $2000 < Re < 4000$ 时,流动可能是层流,也可能是湍流,此区称为过渡区。

9. 流体流动阻力

流体流动阻力包括直管阻力和局部阻力两部分,其计算式为

$$\Sigma W_f = \left(\lambda \frac{L}{d} + \Sigma \zeta \right) \cdot \frac{u^2}{2}$$

或

$$\Sigma W_f = \lambda \frac{L + \Sigma L_e}{d} \cdot \frac{u^2}{2}$$

10. 管路计算

管路可分为简单管路和复杂管路两类。在实际生产中所遇到的简单管路的计算问题一般有以下几种情况:

(1) 管路和输送量已定,求所需要的外加能量或输送设备的功率;

(2) 管路和能提供的输送能量(含输送设备提供的能量、输送系统的位压差、静压差)已定,求管路的输送量或流体流速——输送能力核算;

(3) 管路(管径未知)、输送量和能提供的输送能量已定,求管路直径——管路设计计算。

对于第(1)种情况的计算较为简单;第(2)、(3)两种情况的计算较为复杂,需要用试差法,通常以 λ 为试差变量。

11. 离心泵的气缚现象和汽蚀现象

气缚现象是因为泵启动前泵壳及吸入管路中没有充满液体等原因,而使泵内有气体导致吸不上液体;汽蚀现象是由于叶轮入口处的绝对压强低于操作温度下液体的饱和蒸气压,而使泵不能正常操作。气缚现象和汽蚀现象两者产生的原因不同,现象不同,后果也不同,但都是离心泵的非正常操作现象。

12. 离心泵的工作点及流量调节

(1) 离心泵的工作点:泵安装在特定的管路中,泵的特性曲线 $H-q_v$ 与管路特性曲线 H_e-q_v 的交点。正常工作时,以泵的工作点在其效率最高区域内为宜。

(2) 离心泵的流量调节方法:改变出口阀门开度;改变离心泵的转速;切削叶轮直径。

13. 离心泵的安装高度

离心泵的允许安装高度是指贮槽液面与泵的吸入口之间所允许的垂直距离。

$$H_{g允} = \frac{p_0 - p_v}{\rho g} - (NPSH)_允 - \Sigma H_{f,0-1}$$

根据离心泵样本中提供的允许汽蚀余量 $(NPSH)_允$,即可确定离心泵的允许安装高度。

实际安装时,为了安全,实际安装高度 $H_{g实}$ 应比 $H_{g允}$ 低 0.5~1 m。

14. 往复泵的特点

(1) 往复泵的理论流量与扬程无关,与泵缸尺寸、活塞冲程及往复次数有关。

(2) 往复泵的扬程与泵的几何尺寸无关,与流量无关,而取决于泵的机械强度与原动机的功率。

(3) 启动前不需灌液,即往复泵有自吸能力。

(4) 往复泵的流量调节不能用改变出口阀门开度来进行,而应采用旁路管,或改变活塞的往复次数,或改变活塞的冲程来实现。

(5) 往复泵启动前必须打开出口阀门。

(6) 往复泵适用于输送小流量、高压头、高黏度液体,但不适于输送腐蚀性液体及有固体颗

粒的悬浮液。

【典型例题选解与案例分析】

一、典型例题选解

1. 某燃烧炉所产生的烟气成分如下(均为体积分数):

$$\text{CO}_2: 8.5\% \quad \text{O}_2: 7.0\% \quad \text{N}_2: 74.5\% \quad \text{H}_2\text{O}: 10\%$$

试计算该烟气在温度为 200 °C、压强为 101.33 kPa 时的密度。

解: 烟气的平均摩尔质量为

$$\begin{aligned} M_m &= M_1 y_1 + M_2 y_2 + M_3 y_3 + M_4 y_4 \\ &= (44 \times 0.085 + 32 \times 0.07 + 28 \times 0.745 + 18 \times 0.10) \text{ kg/kmol} \\ &= 28.64 \text{ kg/kmol} \end{aligned}$$

烟气的密度

$$\rho_m = \frac{p M_m}{RT} = \frac{101.33 \times 28.64}{8.314 \times (273 + 200)} \text{ kg/m}^3 = 0.74 \text{ kg/m}^3$$

2. 某地区大气压强为 750 mmHg。有一设备需在真空度为 500 mmHg 条件下操作, 试计算该设备的绝对压强。分别用 mmHg、Pa、kgf/cm² 表示。

解:

$$\begin{aligned} \text{绝对压强} &= \text{大气压强} - \text{真空度} \\ &= (750 - 500) \text{ mmHg} \\ &= 250 \text{ mmHg} \\ &= 33\,330 \text{ Pa} \\ &= 0.34 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

3. 如图 1-1 所示, 用一复式 U 形管压差计测量某蒸汽锅炉中水面上方的蒸汽压强。两 U 形管间的连接管内充满水, 指示液为汞。今测得:

$$h_1 = 2.2 \text{ m}; h_2 = 1.3 \text{ m}; h_3 = 2.8 \text{ m}; h_4 = 1.5 \text{ m};$$

$$h_5 = 3.5 \text{ m}$$

若当地大气压为 1 个标准大气压, 试求锅炉中水面上方的蒸汽压强。

解: 利用等压面变换, 可得以下各式

$$\begin{cases} p_1 = p_{\text{atm}} \\ p_2 = p_1 + \rho_{\text{汞}} g (h_1 - h_2) \\ p_3 = p_2 - \rho_{\text{水}} g (h_3 - h_2) \\ p_4 = p_3 + \rho_{\text{汞}} g (h_3 - h_4) \\ p_0 = p_4 + \rho_{\text{水}} g (h_5 - h_4) \end{cases}$$

联立以上各式, 得

$$\begin{aligned} p_0 &= p_{\text{atm}} + \rho_{\text{汞}} g (h_1 - h_2) - \rho_{\text{水}} g (h_3 - h_2) + \rho_{\text{汞}} g (h_3 - h_4) - \rho_{\text{水}} g (h_5 - h_4) \\ &= [101\,325 + 13\,600 \times 9.81 \times (2.2 - 1.3) - 1\,000 \times 9.81 \times (2.8 - 1.3) + \end{aligned}$$

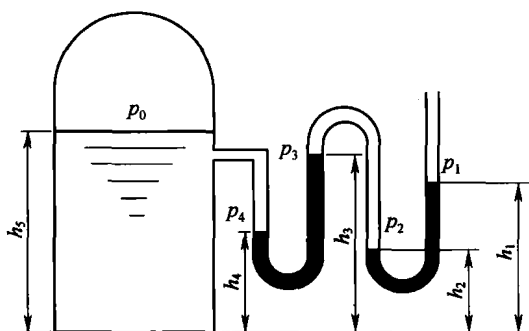


图 1-1

$$13\,600 \times 9.81 \times (2.8 - 1.5) - 1\,000 \times 9.81 \times (3.5 - 1.5)] \text{ Pa} \\ = 360\,505.2 \text{ Pa} = 3.61 \times 10^5 \text{ Pa}$$

4. 在一 $\phi 76 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的无缝钢管中输送压强为 190 kPa (绝对压强)、温度为 60°C 的 CO_2 气体。已知 CO_2 气体在标准状态下的体积流量为 $450 \text{ m}^3/\text{h}$ 。试求该 CO_2 气体在管内的流速、质量流速、体积流量和质量流量。

解: 在给定条件下, CO_2 气体可视为理想气体。操作状态下 CO_2 气体的体积流量为

$$q_v = q_{v_0} \left(\frac{T}{T_0} \right) \left(\frac{p_0}{p} \right) \\ = 450 \times \frac{273 + 60}{273} \times \frac{101.33}{190} \text{ m}^3/\text{h} \\ = 292.74 \text{ m}^3/\text{h} = 0.081 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{流速} \quad u = \frac{q_v}{A} = \frac{0.081}{0.785 \times \left(\frac{76 - 3 \times 2}{1\,000} \right)^2} \text{ m/s} = 21.06 \text{ m/s}$$

操作状态下 CO_2 的密度为

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} = \frac{M}{22.4} \cdot \frac{T_0 p}{T p_0} \\ = \frac{44}{22.4} \times \frac{273}{273 + 60} \times \frac{190}{101.33} \text{ kg/m}^3 \\ = 3.02 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{质量流速} \quad G = \rho u = 3.02 \times 21.06 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) = 63.60 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

$$\text{质量流量} \quad q_m = \rho q_v = 3.02 \times 0.081 \text{ kg/s} = 0.245 \text{ kg/s}$$

5. 如图 1-2 所示, 用压缩空气将密闭贮槽中密度为 $1\,840 \text{ kg/m}^3$ 的硫酸送至敞口高位槽, 输送量为 $9 \text{ m}^3/\text{h}$ 。输送管道采用 $\phi 60 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 的无缝钢管, 管路的总能量损失为 1.6 m 液柱 (不包括出口损失), 密闭贮槽中的液面与压出管口的垂直距离为 14 m , 且在输送过程中保持恒定。试求密闭贮槽中应保持多大的压力?

解: 取密闭贮槽液面为 $1-1'$ 截面, 压出管出口界面内侧为 $2-2'$ 截面, 以过 $1-1'$ 截面的水平面为基准面。

在 $1-1'$ 和 $2-2'$ 截面间列伯努利方程

$$z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + H_e = z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + \sum H_f$$

其中

$$z_1 = 0$$

$$u_1 \approx 0$$

$$H_e = 0$$

$$z_2 = 14 \text{ m}$$

$$p_2 = 0 \text{ (表压)}$$

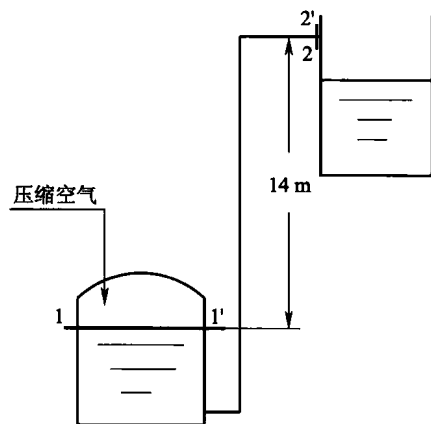


图 1-2

$$u_2 = \frac{q_v}{A} = \frac{9}{3600 \times 0.785 \times 0.053^2} \text{ m/s} = 1.13 \text{ m/s}$$

$$\sum H_f = 1.6 \text{ m}$$

将以上各项代入伯努利方程中,得

$$\frac{p_1}{1840 \times 9.81} = 14 + \frac{1.13^2}{2 \times 9.81} + 1.6$$

$$p_1 = 282.76 \text{ kPa (表压)}$$

即密闭贮槽中的压力应保持为 282.76 kPa(表压)。

6. 如图 1-3 所示,用泵将溶液从反应器送到高位槽,流量为 $2 \times 10^4 \text{ kg/h}$ 。高位槽内压强保持 98.3 kPa(表压)。管道采用 $\phi 76 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,长为 60 m 的钢管。管道中装有一个全开闸阀,一个全开球心阀,2 个 90° 标准弯头。反应器内液面与管路出口的距离为 18 m。泵的总效率为 0.70,试求泵的轴功率。已知溶液 $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.65 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,管壁的绝对粗糙度 $\epsilon = 0.3 \text{ mm}$ 。

解:取反应器液面为 1-1' 截面,溶液管出口界面内侧为 2-2' 截面,以过 1-1' 截面的水平面为基准面。

在 1-1' 与 2-2' 截面间列伯努利方程

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

其中 $z_1 = 0$; $u_1 \approx 0$; $p_1 = 0$ (表压); $z_2 = 18 \text{ m}$;

$$u_2 = \frac{q_m}{\rho A} = \frac{2 \times 10^4}{3600 \times 1100 \times 0.785 \times 0.07^2} \text{ m/s} = 1.31 \text{ m/s}$$

$$p_2 = 98.3 \text{ kPa (表压)}$$

溶液在管内流动的雷诺数

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{0.07 \times 1.31 \times 1100}{0.65 \times 10^{-3}} = 1.55 \times 10^5 > 4000, \text{ 为湍流。}$$

管壁的粗糙度 $\epsilon = 0.3 \text{ mm}$, 则

$$\frac{\epsilon}{d} = \frac{0.3}{70} = 0.0043$$

查得摩擦系数

$$\lambda = 0.029$$

查表得:进口, $\zeta = 0.5$; 90° 标准弯头, $\zeta = 0.75$; 全开闸阀, $\zeta = 0.17$; 全开球心阀, $\zeta = 6.4$ 。

$$\text{所以 } \sum W_f = \left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{u^2}{2}$$

$$= \left(0.029 \times \frac{60}{0.07} + 0.5 + 2 \times 0.75 + 0.17 + 6.4 \right) \times \frac{1.31^2}{2} \text{ J/kg} = 28.68 \text{ J/kg}$$

将以上各项代入伯努利方程中,得

$$W_e = \left(9.81 \times 18 + \frac{1.31^2}{2} + \frac{98.3 \times 10^3}{1100} + 28.68 \right) \text{ J/kg} = 295.48 \text{ J/kg}$$

泵的有效功率

$$P_e = q_m \cdot W_e = \frac{2 \times 10^4}{3600} \times 295.48 \text{ W} = 1641.56 \text{ W}$$

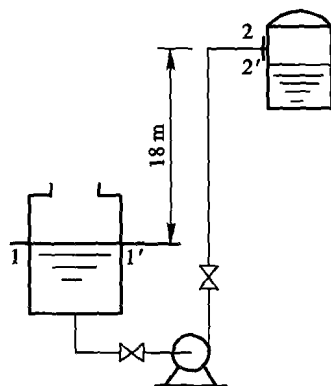


图 1-3

泵的轴功率

$$P = \frac{P_e}{\eta} = \frac{1\,641.56}{0.70} \text{ W} = 2.35 \text{ kW}$$

7. 有一水位恒定的水槽,槽的底部连接一 $\phi 76 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 钢管,如图 1-4 所示。管路上装有一闸阀,在距离管入口端 30 m 处装一 U 形管压差计,指示液为汞。测压点与管路出口端之间的直管长度为 10 m。当阀门关闭时,测得 $R = 500 \text{ mm}$, $h = 1\,200 \text{ mm}$ 。当阀门部分开启时,测得 $R = 300 \text{ mm}$, $h = 1\,100 \text{ mm}$ 。则此时管中水的流量为多少?当闸阀全开时,U 形管压差计的读数为多少?(两种情况摩擦系数均取 0.024。)

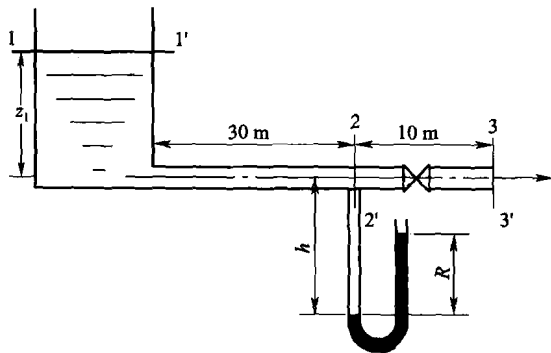


图 1-4

解:取水槽面为 1-1' 截面,U 形管压差计测压面为 2-2' 截面,管路出口界面内侧为 3-3' 截面,以过 2-2' 截面中心线的水平面为基准面。

阀门关闭时,有

$$\begin{aligned} \rho_w g(z_1 + h) &= \rho_{\text{汞}} gR \\ z_1 &= \frac{\rho_{\text{汞}} gR}{\rho_w g} - h \\ &= \left(\frac{13\,600 \times 0.5}{1\,000} - 1.2 \right) \text{ m} = 5.6 \text{ m} \end{aligned}$$

阀门部分开启时,在 1-1' 与 2-2' 截面间列伯努利方程

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

其中 $z_1 = 5.6 \text{ m}$; $u_1 = 0$; $p_1 = 0$ (表压); $W_e = 0$; $z_2 = 0$;

$$\begin{aligned} p_2 &= \rho_{\text{汞}} gR - \rho_w gh \\ &= (13\,600 \times 9.81 \times 0.3 - 1\,000 \times 9.81 \times 1.1) \text{ Pa} \\ &= 29\,233.8 \text{ Pa} \quad (\text{表压}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum W_f &= \left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{u_2^2}{2} \\ &= \left(0.024 \times \frac{30}{0.07} + 0.5 \right) \cdot \frac{u_2^2}{2} = 10.79 \cdot \frac{u_2^2}{2} \end{aligned}$$

将各项代入伯努利方程,得

$$\begin{aligned} 9.81 \times 5.6 &= \frac{u_2^2}{2} + \frac{29\,233.8}{1\,000} + 10.79 \cdot \frac{u_2^2}{2} \\ u_2 &= 2.09 \text{ m/s} \end{aligned}$$

水的流量

$$q_V = 3\,600 \frac{\pi}{4} d^2 u_2 = 3\,600 \times 0.785 \times 0.07^2 \times 2.09 \text{ m}^3/\text{h} = 28.94 \text{ m}^3/\text{h}$$

阀门全开时,在 1-1' 与 3-3' 截面间列伯努利方程

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gz_3 + \frac{u_3^2}{2} + \frac{p_3}{\rho} + \sum W_{f,1-3}$$

其中 $z_1 = 5.6 \text{ m}$; $u_1 = 0$; $p_1 = 0$ (表压); $W_e = 0$; $z_3 = 0$; $p_3 = 0$ (表压);

$$\begin{aligned}\sum W_{f,1-3} &= \left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{u_3^2}{2} \\ &= \left(0.024 \times \frac{40}{0.07} + 0.5 + 0.17 \right) \cdot \frac{u_3^2}{2} = 14.38 \cdot \frac{u_3^2}{2}\end{aligned}$$

将各项代入伯努利方程,得

$$9.81 \times 5.6 = \frac{u_3^2}{2} + 14.38 \cdot \frac{u_3^2}{2}$$

$$u_3 = 2.67 \text{ m/s}$$

再在 1-1' 与 2-2' 截面间列伯努利方程

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum W_{f,1-2}$$

其中 $z_1 = 5.6 \text{ m}$; $u_1 = 0$; $p_1 = 0$ (表压); $W_e = 0$; $z_2 = 0$; $u_2 = u_3 = 2.67 \text{ m/s}$

$$\begin{aligned}\sum W_{f,1-2} &= \left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{u^2}{2} \\ &= \left(0.024 \times \frac{30}{0.07} + 0.5 \right) \times \frac{2.67^2}{2} \text{ J/kg} = 38.45 \text{ J/kg}\end{aligned}$$

将各项代入伯努利方程,得

$$9.81 \times 5.6 = \frac{2.67^2}{2} + \frac{p_2}{1000} + 38.45$$

$$p_2 = 12921.55 \text{ Pa}$$

由于

$$p_2 = \rho_{\text{水}} g R' - \rho_{\text{水}} g h'$$

设

$$h' = h + \Delta h, \quad R' = R + 2\Delta h$$

则

$$p_2 = \rho_{\text{水}} g (R + 2\Delta h) - \rho_{\text{水}} g (h + \Delta h)$$

$$12921.55 = 13600 \times 9.81 \times (0.3 + 2\Delta h) - 1000 \times 9.81 \times (1.1 + \Delta h)$$

$$\Delta h = -0.063 \text{ m}$$

故

$$h' = h + \Delta h = 1.1 - 0.063 = 1.037 \text{ m} = 1037 \text{ mm}$$

$$R' = R + 2\Delta h = 0.3 - 2 \times 0.063 = 0.174 \text{ m} = 174 \text{ mm}$$

8. 用一台型号为 IS65—50—125 的离心泵将敞口贮槽中 40 °C 的清水送出,吸入管中的压头损失为 5.5 m,当地大气压为 101.33 kPa。试确定此泵的安装高度。

解:由离心泵规格表查得 IS65—50—125 离心泵的汽蚀余量为 2.0 m;查表得 40 °C 水的饱和蒸气压为 7.377 kPa,密度为 992.2 kg/m³。

泵的允许安装高度

$$\begin{aligned}H_{s\text{允}} &= \frac{p_0 - p_v}{\rho g} - (NPSH)_{\text{允}} - \sum H_{f,0-1} \\ &= \left(\frac{101.33 \times 10^3 - 7.377 \times 10^3}{992.2 \times 9.81} - 2 - 5.5 \right) \text{ m}\end{aligned}$$

$$=2.15 \text{ m}$$

为了安全,泵的实际安装高度应为

$$2.15 \text{ m} - (0.5 \sim 1) \text{ m} = 1.65 \text{ m} \sim 1.15 \text{ m}$$

9. 某离心泵在一定转速下的特性方程为

$$H = 34.5 - 17q_v^2$$

式中 q_v 的单位为 m^3/min 。用该泵将密度为 $1180 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的液体由敞口贮槽送到敞口高位槽,两槽中液面的垂直距离保持 15 m 。已知当流量为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,所需要的扬程为 25 m 。试求该泵在管路中的工作点。

解:因为

$$A = \Delta z + \frac{\Delta p}{\rho g} = 15 \text{ m}$$

管路特性方程

$$H_e = A + Bq_v^2 = 15 + Bq_v^2$$

将 $q_v = 50 \text{ m}^3/\text{h} = 0.83 \text{ m}^3/\text{min}$, $H_e = 25 \text{ m}$ 代入方程中

$$25 = 15 + B \times 0.83^2$$

得

$$B = 14.52$$

因此,管路特性方程为

$$H_e = 15 + 14.52q_v^2$$

联立管路与泵的特性方程

$$\begin{cases} H_e = 15 + 14.52q_v^2 \\ H = 34.5 - 17q_v^2 \end{cases}$$

解得该泵在管路中的工作点为

$$\begin{cases} q_v = 0.79 \text{ m}^3/\text{min} \\ H = 23.89 \text{ m} \end{cases}$$

10. 用泵将水由水井送入一与大气相通水塔中,水塔中水面比井中水面高 25 m 。管路长度(包括局部阻力的当量长度)为 70 m 。要求输水量为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 。已知井水的密度为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$,管路的摩擦系数 $\lambda = 0.022$ 。

(1) 选择一适当管路;

(2) 现有一离心泵,其铭牌上标出流量为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程为 32 m ,效率为 0.73 ,电机功率为 7.6 kW ,问此泵是否合用?

解:(1) 取水在管内的流速为 $u = 2 \text{ m}/\text{s}$,则

$$d = \sqrt{\frac{q_v}{0.785u}} = \sqrt{\frac{50}{3600 \times 0.785 \times 2}} \text{ m} = 0.094 \text{ m} = 94 \text{ mm}$$

查管子规格表知,可选用 $\phi 108 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的无缝钢管,其内径

$$d = (108 - 2 \times 4) \text{ mm} = 100 \text{ mm} = 0.1 \text{ m}$$

水在管道内的实际流速

$$u = \frac{50}{3\,600 \times 0.785 \times 0.1^2} \text{ m/s} = 1.77 \text{ m/s}$$

(2) 在井中水面与水塔中水面间列伯努利方程

$$\begin{aligned} H_e &= (z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \sum H_{f,1-2} \\ H_e &= (z_2 - z_1) + \lambda \left(\frac{l + \sum l_e}{d} \right) \frac{u^2}{2g} \\ &= \left(25 + 0.022 \times \frac{70}{0.1} \times \frac{1.77^2}{2 \times 9.81} \right) \text{ m} = 27.46 \text{ m} \end{aligned}$$

由以上计算可知

$$\begin{cases} q_v = 50 \text{ m}^3/\text{h} \\ H_e = 27.46 \text{ m} \end{cases}$$

故该泵合用。

二、案例分析

案例 1——离心泵不能正常启动

1. 案例提出

某化工厂厂内有一台离心泵在启动时经常会出现跳闸,不能向反应器输送液体。

现场检查发现泵所用的电机有保护装置,当电机负荷太大时,电机会自动跳闸。据此,技术人员初步判断是轴封太紧,但盘车后发现并非如此。

然后技术人员仔细询问操作人员后得知,反应器为间歇加料,第一次加料时可顺利加入,而再次加料时则会出现跳闸的现象。

另外一个重要的情况是操作人员在开停泵时,从不关闭管路上的离心泵出口阀,并没有严格遵照操作规程。

2. 问题分析

第一次加料时泵的出口管内没有液体,反应器内为常压,离心泵出口背压低,因此电机只需带动离心泵,并适当提高泵内液体动能即可,即使出口阀是开启的,也不会增大电机的启动负荷,因此电机的启动电流仍在过载保护电流以下,泵也就能顺利启动。

而当再次加料时,反应器内已经具有一定的压力,此时泵的背压较高,同时出口管内又已充满了液体,因此如果出口阀是开着的,那么离心泵在启动的一瞬间,电机除了要带动泵从静止加速到高达 2 900 r/min 外,还要将泵内与管内的液体动能提高到一定值,并要将泵出口处液体的压力提高到比背压略高才能将液体送入反应器,这样一来,启动负荷必然很大,已超出电机过载保护的设置,所以出现了跳闸。

3. 问题解决

按照操作规程的要求,停泵前先关闭出口阀;开泵前,泵的出口阀必须处于关闭状态;启动电机待泵运转正常后,再逐渐打开出口阀,调节到所需的流量。按此步骤进行操作后,泵就能正常启动了。

另外,如果泵所使用的电机没有电流过载的保护装置,而操作工又长时间不按操作规程进行操作的话,那就极有可能会把电机烧坏,从而造成不必要的经济损失。

案例 2——离心泵被严重汽蚀

1. 案例提出

某长江边上化肥厂建成开车半年左右,发现全厂生产用水不够用,最终全厂停车。

检查后,发现邻近江边的水泵房中的 4 台小泵受到了不同程度的汽蚀,最严重的一台是主泵,其叶轮前后盖板被击穿 100 多个孔,最大的孔面积达到了 52 mm^2 ,另外 3 台备用泵的叶轮上被击穿的孔不多,但是被剥蚀的也很严重。显然,生产用水不够用是由于泵已经被汽蚀损失而造成的。

为什么仅仅半年时间这些泵就被损坏到如此严重的程度呢?

2. 问题分析

(1) 那一年长江水位特别低,泵的安装高度超过了允许吸上高度,这是造成泵被汽蚀的主要原因(泵在安装时,没有考虑长江的历年最低水位);

(2) 继续检查后发现:主泵的入口管内卡着一个施工用的塑料桶,造成泵的进口阻力太大,使得叶轮入口处压强太低,泵在刚开始使用时(尽管当时水位还没有降低到最低水位)就很容易发生汽蚀,而操作人员一直没有发现,只是一味地用增加泵来增加流量,而此后长江水位的降低,也就造成其他备用泵发生了汽蚀现象。

因此,安装时的疏忽与检查不力,以及操作上的判断错误是造成汽蚀的第二个原因;

(3) 经过机械专家对叶轮材料的分析后又发现了第三个原因:叶轮所用的材料也不符合要求。

3. 问题解决

找到原因后,该厂通过更换离心泵、除去施工垃圾、降低安装高度,使生产恢复了正常。但由于疏忽大意,造成的这起轰动一时的重大事件,严重影响了正常生产,教训很深刻。

【自测与练习】

一、填空题

1. 气体具有较大的压缩性和热膨胀性,其密度随()和()的变化而变化。
2. 工厂车间管廊及设备的管线常用导线连接起来,其目的是()。
3. 石油化学工业中,常用的法兰标准有()标准和()标准。
4. 对于长距离输送高温介质的管线,其热补偿最好选用()。
5. 孔板流量计是利用流体流经孔板时,在孔板前后产生()来测流量的。
6. 以()作起点计算的压强叫绝对压强。
7. 在一定温度和压力下,单位体积内所具有的物质()称为该物质在此温度和压力下的密度。
8. 物质以扩散的方式从一相转到另一相的过程为()。
9. 指出下列符号代表的阀门型号。G:() Z:() A:()。
10. 石油化工生产具有的三大特点是()、()、()。
11. 装置引入蒸气时要防止()。
12. 单位时间内流过管道()的流体量称为流量。