

职业技能鉴定培训教程

初级、中级

化工三废处理工

黄海林 晋卫 编



化学工业出版社

职业技能鉴定培训教程

初级、中级

化工三废处理工

黄海林 晋 卫 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书根据化学工业职业标准《化工三废处理工》编写而成。

全书共分7章,从基本知识入手,分别讲述了设备常识、微生物学基础、废气处理技术、废水及废水水质控制基础、废水处理技术概述、固体废物处理技术等内容。

本书可供化工三废处理人员考级、培训使用。

图书在版编目(CIP)数据

化工三废处理工(初级、中级)/黄海林,晋卫编. —北京:化学工业出版社,2007.5

职业技能鉴定培训教程

ISBN 978-7-122-00056-9

I. 化… II. ①黄…②晋… III. 化学工业废物-废物处理-职业技能鉴定-教材 IV. X78

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第029780号

责任编辑:辛田 赵丽霞

文字编辑:廉静

责任校对:宋夏

装帧设计:于兵

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张13¼ 字数239千字 2007年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:24.00元

版权所有 违者必究

前言

本书根据化学工业职业标准《化工三废处理工》编写而成。

本书在编写过程中，以强化应用为目的，以理论够用为原则，力求深入浅出，简明扼要，充分体现教材的针对性、实用性，便于组织教学，以便满足不同层次职业工人的需要，提高职业工人的理论知识水平和操作技能。

为适应化工三废处理操作工职业技能鉴定的要求，本书突出了实际应用知识，兼顾基础理论知识，根据初级、中级、高级和技师等不同层次，分别对化工行业废气、废水、固体废物处理技术的原理、重要工艺、实际操作、重点设备等进行详细叙述，循序渐进，高级别涵盖低级别，使操作工能快速、熟练掌握理论知识水平和操作技能，提高分析、解决实际问题的能力，达到职业技能鉴定要求。

本书由黄海林、晋卫共同编写。

由于编者水平有限，书中定会有不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2007 年 2 月

目录

第1章 基础知识	1
1.1 单位制度	1
1.2 流体力学基础知识	3
1.2.1 密度和压力	3
1.2.2 流量和流速	5
1.2.3 伯努利方程式	6
1.2.4 流体阻力的计算	11
1.3 环境保护概论	21
1.3.1 环境	21
1.3.2 环境问题	24
1.3.3 环境保护是我国的一项基本国策	28
复习思考题	31
第2章 设备常识	33
2.1 设备管理	33
2.1.1 设备管理的意义	33
2.1.2 设备的技术状态	34
2.1.3 设备的使用	35
2.1.4 设备的维护	36
2.1.5 设备的润滑	37
2.2 常用机械设备	40
2.2.1 管道	40
2.2.2 阀门	42
2.2.3 泵	46
2.2.4 风机	59
复习思考题	62
第3章 微生物学基础	63
3.1 细菌的形态和构造	64
3.1.1 细菌的形态	64
3.1.2 细菌的构造	65
3.2 细菌的生理特性	67

3.2.1 细菌的营养	67
3.2.2 酶及其作用	68
3.2.3 细菌的呼吸	69
3.3 细菌的生长与变异	70
3.3.1 细菌的繁殖和生长曲线	70
3.3.2 细菌的遗传与变异	72
3.4 其他微生物	72
3.4.1 高等细菌	73
3.4.2 真菌	74
3.4.3 藻类	74
3.4.4 原生动物	76
3.4.5 后生动物	78
3.5 废水生物处理中微生物的作用	78
3.5.1 好氧生物处理	79
3.5.2 厌氧生物处理	80
复习思考题	81
第4章 废气处理技术	82
4.1 大气污染及其防治	82
4.1.1 大气结构与组成	82
4.1.2 主要大气污染物及其来源	85
4.1.3 大气污染综合防治	90
4.2 化工废气及废气治理	92
4.2.1 化工废气及废气中的污染物	92
4.2.2 化工废气的防治措施	93
4.3 大气污染的防治技术	96
4.3.1 除尘技术简介	96
4.3.2 有害气体治理基本方法简介	104
4.3.3 污染物稀释法控制	111
复习思考题	111
第5章 废水及废水水质控制基础	112
5.1 废水与废水中的污染物	112

5.1.1 水的循环	112
5.1.2 水体污染与废水污染	114
5.1.3 废水中主要污染物的来源及其危害	121
5.2 废水水质控制基础	123
5.2.1 水质指标	123
5.2.2 废水的污染防治	126
复习思考题	129
第6章 废水处理技术	130
6.1 废水处理技术的分类	130
6.2 物理法	132
6.2.1 重力分离法	132
6.2.2 筛滤法	137
6.2.3 离心分离法	141
6.2.4 气浮法	141
6.3 化学法	143
6.3.1 化学沉淀法	143
6.3.2 混凝法	144
6.3.3 中和法	147
6.3.4 氧化还原法	150
6.4 物理化学法	151
6.4.1 萃取(液-液)法	151
6.4.2 吸附法	152
6.4.3 离子交换法	152
6.4.4 膜分离法	156
6.5 生物法	159
6.5.1 好氧生物处理法	159
6.5.2 厌氧生物处理法	173
6.5.3 自然净化法	174
6.6 污水处理流程	174
复习思考题	175
第7章 固体废物处理技术	177

7.1 固体废物概论	177
7.1.1 概念	177
7.1.2 固体废物的来源与分类	177
7.1.3 固体废物的排放和危害	178
7.1.4 固体废物污染的综合防治	180
7.2 固体废物处理技术简介	182
7.2.1 预处理技术	182
7.2.2 焚烧处理技术	193
7.2.3 热解处理技术	198
7.2.4 微生物分解技术	199
复习思考题	200
参考文献	201

1.1 单位制度

任何物理量的大小都是用数字与单位两者的乘积表示的。运算时，物理量的单位与数字应一并纳入运算。

一般说来，物理量的单位是可以任意选择的。但是，各种物理量间存在着客观的联系，因此不必对每种物理量的单位都独立进行任意的选择，而可通过一些物理量的单位来量度另一些物理量。通常先任意选定几个独立的物理量（如长度、时间等），称为基本量，并根据使用方便的原则制定出这些量的单位，称为基本单位。其他诸量（如速度、加速度等）的单位便可根据它们与基本量之间的关系来确定。这些物理量称为导出量，其单位称为导出单位。

基本单位与导出单位的总和称为单位制。

常见的几种单位制所用的基本量与基本单位如表 1-1 所示。

表 1-1 常见单位制度的基本单位

	长 度	时 间	质 量	力
绝对单位制				
CGS 制	cm(厘米)	s(秒)	g(克)	—
MKS 制	m(米)	s	kg(千克或公斤)	—
工程单位制(重力单位制)	m	s	—	kgf(公斤力)
国际单位制(SI)	m	s	kg	—

绝对单位制和国际制均以长度、时间和质量为基本量。工程单位制以长度、时间、力为基本量，其中力的单位为 kgf。1kgf 等于质量为 1kg 的物体在重力加速度为 9.81m/s^2 的海平面上所受到的重力。

长期以来，整个科学技术领域里存在着多制并用的局面。同一个物理量在不同的单位制中具有不同的单位与数值，这就给计算和交流带来了麻烦，并且容易引起错误。为改变这种局面以统一计量单位制，1960 年 10 月第 11 届国际计量大会通过了“国际单位制”，其国际简称是 SI。

SI 共规定了七个基本单位，除 m、kg、s 之外，又加上热力学温度单位 K

(开尔文, 简称开), 电流单位 A (安培, 简称安), 光强度单位 cd (坎德拉, 简称坎) 和物质的量单位 mol (摩尔, 简称摩)。

国际单位制有两大优点: 一是它的通用性, 在自然科学、工程技术乃至国民经济各部门中, 所有物理量的单位都可由上述七个基本单位导出。也就是说, SI 是所有科学、技术、经济部门都可采用的一套相当完整的单位制。二是它的一贯性, 任何一个导出单位在由上述七个基本单位相乘或相除而导出时, 都不需引入比例系数。SI 中每种物理量只有一个单位。譬如, 热和功是本质相同的物理量 (能量), 但在工程单位制中, 热的单位是 kcal (千卡), 功的单位是 $\text{kgf} \cdot \text{m}$, 在运算中必须通过所谓“热功当量” ($1\text{kcal}=427\text{kgf} \cdot \text{m}$) 这样一个比例系数来换算。而在 SI 中, 热、功、能三者的单位都采用 J (焦耳), 无需再用换算因数。

鉴于国际单位制的优越性, 近年来它在世界上推广很快, 目前已有六十多个国家宣布采用。国务院 1977 年 5 月规定我国要“逐步采用国际单位制”, 经过几年的试用和征求意见, 于 1984 年 2 月 27 日发布了“关于在我国统一实行法定计量单位的命令”。在法定计量单位中, 包括了全部属于国际单位制的单位, 计有: SI 基本单位、辅助单位、具有专门名称的导出单位 (见表 1-2) 和词头。此外, 还确定了 15 个非国际制单位与国际制单位并用, 组成我国的法定计量单位。

表 1-2 具有专门名称的某些导出单位

物 理 量	单 位 名 称	单 位 符 号	物 理 量	单 位 名 称	单 位 符 号
频率	赫[兹]	Hz	能、功、热量	焦[耳]	J
力	牛[顿]	N	功率	瓦[特]	W
压力(压强)	帕[斯卡]	Pa	摄氏温度	摄氏度	℃

注: 表中单位名称, 去掉方括号时为单位名称的全称, 去掉方括号及其中的字即成为单位名称的简称, 下同。

要使 SI 为人们所熟悉并取代其他单位制, 毕竟尚需一定时间。目前从各种来源得到的数据, 其单位不一定符合计算要求, 必须进行单位换算, 因此应掌握单位换算的方法。

物理量由一种单位换算成另一种单位时, 量本身并无变化, 但数值要改变。换算时要乘以两单位间的换算因数。所谓换算因数, 就是彼此相等而各有不同单位的两个物理量之比。譬如, 1kgf (工程制) 的力和 9.81N (国际制) 的力是两个相等的物理量, 但其所用的单位不同, 即

$$1\text{kgf}=9.81\text{N}$$

那么, kgf 和 N 两种单位间的换算因数便是

$$\frac{9.81\text{N}}{1\text{kgf}}=9.81\text{N/kgf}$$

【例 1.1】一标准大气压 (1atm) 的压力等于 1.033kgf/cm^2 , 试求此压力在 SI 中为多少 Pa。

解: 先列出有关各量不同单位间的关系:

$$1\text{kgf}=9.81\text{N}$$

$$1\text{cm}^2=10^{-4}\text{m}^2$$

因此

$$1\text{atm}=1.033\text{kgf/cm}^2$$

$$=1.033 \frac{\text{kgf} \times 9.81\text{N/kgf}}{\text{cm}^2 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{cm}^2}$$

$$=1.033 \times 9.81 \times 10^4 \text{N/m}^2$$

$$=101300\text{N/m}^2$$

$$=101300\text{Pa}$$

【例 1.2】求把密度单位由 g/cm^3 换算成 kg/m^3 时的换算因数。

解:

$$1\text{g}=10^{-3}\text{kg}$$

$$1\text{cm}^3=10^{-3}\text{m}^3$$

所以

$$1\text{g/cm}^3 = \frac{10^{-3}\text{kg}}{10^{-6}\text{m}^3} = 10^3\text{kg/m}^3$$

换算因数为 10^3 。

第1章

1.2 流体力学基础知识

1.2.1 密度和压力

(1) 密度

单位体积流体所具有的质量, 称为流体的密度。其表达式为

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

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

任何流体的密度, 都随它的温度和压力而变化。压力对液体的密度影响很小, 可忽略不计。因此, 常称液体为不可压缩的流体。温度对液体的密度有一定影响, 如纯水的密度在 4°C 时为 1000kg/m^3 , 在 20°C 时为 998.2kg/m^3 , 在 100°C 时则为 958.4kg/m^3 。

液体的密度一般用实验方法测定。工业上测定液体密度最简单的方法是用比重计。将比重计放在液体中, 即可在比重计上读出液体的相对密度。

相对密度为流体密度与 4℃ 时的水密度之比, 习惯称为比重, 相对密度是没有单位的。

气体具有可压缩性及热膨胀性, 其密度随温度和压力有较大的变化。在工程计算中, 对一般温度和压力下的气体, 可按理想气体来处理。

由理想气体状态方程式

$$pV = nRT = (m/M)RT$$

$$\text{则} \quad \rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \text{ kg/m}^3 \quad (1-2)$$

式中 p ——气体的压力, kPa;

T ——气体的温度, K;

M ——气体的摩尔质量, kg/kmol;

R ——通用气体常数, 8.314 kJ/(kmol · K)。

任何气体的 R 值均相同。 R 的数值, 随所用 p 、 V 、 T 等的单位不同而异。选用 R 值时, 应注意其单位。

【例 1.3】 求甲烷在 47℃ 和 0.5 MPa 时的密度。

解: 已知 $p = 0.5 \text{ MPa} = 500 \text{ kPa}$

$$T = 47 + 273 = 320 \text{ K}$$

$$M = 16 \text{ kg/kmol}$$

$$R = 8.314 \text{ kJ/(kmol} \cdot \text{K)}$$

$$\text{则} \quad \rho = \frac{pM}{RT} = \frac{500 \times 16}{8.314 \times 320} = 3.01 \text{ kg/m}^3$$

(2) 压力 (压强)

垂直作用于单位流体面积上的力, 称为流体的压力强度或流体静压力, 简称压力或压强。其表达式为

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-3)$$

式中 p ——流体的压力, Pa;

F ——流体垂直作用于面积 A 上的力, N;

A ——作用面的面积, m^2 。

在 SI 中, 压力的单位是 N/m^2 (牛每平方米), 其专用名称为帕斯卡, 简称帕, 代号为 Pa。

在我国法定计量单位全面取代其他单位之前, 工厂中还采用许多制外压力单位, 所以应掌握帕与其他单位的换算关系。

在生产现场或资料中常用的制外压力单位有: atm (标准大气压)、mmHg (毫米汞柱)、 mH_2O (米水柱) 或 kgf/cm^2 等, 它们之间的换算关系为

$$\begin{aligned}
 1\text{atm} &= 101.3\text{kPa} \\
 &= 1.033\text{kgf/cm}^2 \\
 &= 760\text{mmHg} \\
 &= 10.33\text{mH}_2\text{O}
 \end{aligned}$$

以往工程上为了使用和换算方便,常将 1kgf/cm^2 近似地当作 1 个大气压,称为 1 工程大气压,表以 at 。

流体的压力除了可以用不同的单位来计量以外,还可以用不同的压力基准来表示。

以绝对零压作起点计算的压力,称为绝对压力,简称绝压,是流体的真实压力。

流体的压力可用测压仪表来测量,当被测流体的绝压大于外界大气压力时,压力表上的读数表示被测流体的绝压比大气压力高出的数值,称为表压力,简称表压,即

$$\text{表压力} = \text{绝对压力} - \text{大气压力} \quad (1-4)$$

当被测流体的绝压小于外界大气压力时,真空表上的读数表示被测流体的绝压低于大气压力的数值,称为真空度,即

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力} \quad (1-5)$$

真空度越高则绝压越低;真空度最大值等于大气压力;真空度为定值时,大气压力越大,则绝压越大。记录真空度时,必须同时把当时的大气压力注明,否则无法计算绝压。如将真空度刻在压力表上,零点的两侧分别为表压和真空度。所以真空度又称负压,或简称负压。

应当指出,大气压力随设备所在地区而不同,在同一地区,也会随季节气候而稍有不同。

1.2.2 流量和流速

(1) 流量

单位时间内流过管路任一截面的流体量,称为流量。流量有两种表示方法。

① 体积流量 单位时间内流过管路任一截面的流体体积,称为体积流量,简称流量,以 V 表示,其单位为 m^3/s 。

因为气体的体积随温度和压力而变化,故气体的体积流量应注明温度和压力。

② 质量流量 单位时间内流经管路任一截面的流体质量,称为质量流量,以 G 表示,其单位为 kg/s 。

体积流量和质量流量的关系为

$$G=V\rho \quad (1-6)$$

(2) 流速

单位时间内流体在流动方向上所流过的距离,称为流速。流速也有两种表示方法。

① 平均流速 实验证明,流体流经管路任一截面上各点的流速沿管径而变化,管路中心处流速最大,越靠近管壁处流速越小,在管壁处流速为零。流体在管截面上的速度分布规律较为复杂,工程计算中为方便起见,流体的流速通常是指整个管截面上的平均流速,简称流速,以 u 表示,其单位为 m/s 。

流量与流速的关系为

$$u=\frac{V}{S}=\frac{G}{\rho S} \quad (1-7)$$

式中 S ——管路的截面积, m^2 。

② 质量流速 由于气体的体积流量随温度和压力而变化,气体的流速也随之而变。因此,对气体采用质量流速较为方便。质量流量与管路截面积之比称为质量流速,以 ω 表示,其单位为 $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。

$$\omega=G/S=V\rho/S=u\rho \quad (1-8)$$

质量流速的物理意义是,单位时间内流过管路单位截面积的流体质量。

1.2.3 伯努利方程式

流体在稳定流动时,应服从能量守恒定律,依据这一定律,单位时间内输入管路系统的能量应等于从管路系统中输出的能量。伯努利方程式即依据这一定律导出的。

从物理学中得知,物质所具有的能量形式是多种多样的,如机械能、内能、电磁能、原子核能等。但在流体流动系统里,流体的能量主要表现为机械能和内能。其他形式的能量或不存在,或可忽略。流体的内能与温度有关,若输送管路上有换热器把流体加热或冷却,可使其内能改变。但不可压缩流体受热不膨胀,其内能不能转化为机械能,对流体输送不起作用。所以对液体进行能量衡算时,内能一项可不列入。这样,在液体的流动中,只考虑机械能守恒及各种形式机械能的转换就可以了。

1.2.3.1 流体的机械能

流体进出所划定的流动系统时,带进和带出的机械能有下列几项。

(1) 位能

流体因受重力作用,在不同高度处具有不同的位能,相当于质量为 $m(\text{kg})$ 的流体自基准水平面升举到某高度 $z(\text{m})$ 所做的功,即

$$\text{位能} = mgz \quad \text{N} \cdot \text{m} \text{ 或 } \text{J}$$

1kg 流体输入与输出的位能分别为 gz_1 与 gz_2 ，其单位为 J/kg。位能是个相对值，随所选的基准水平面位置而定，在基准水平面以上的位能为正值，以下为负值。

(2) 动能

流体以一定速度运动时，便具有一定的动能。质量为 $m(\text{kg})$ ，流速为 $u(\text{m/s})$ 的流体所具有的动能为

$$\text{动能} = \frac{1}{2}mu^2 \quad \text{N} \cdot \text{m} \text{ 或 } \text{J}$$

1kg 流体输入与输出的动能分别为 $\frac{1}{2}mu_1^2$ 与 $\frac{1}{2}mu_2^2$ ，其单位为 J/kg。

(3) 静压能

固体运动时只具有位能和动能，而连续流动的流体还具有静压能。静止流体内部任一处都有一定的静压力，其实流动着的流体内部任一处也同样有一定的静压力。如果在内部有液体流动的管壁上开孔，并与一根垂直的玻璃管相接，液体便会在玻璃管内上升，如图 1-1 所示，上升的液柱高度便是这个静压力的表现。

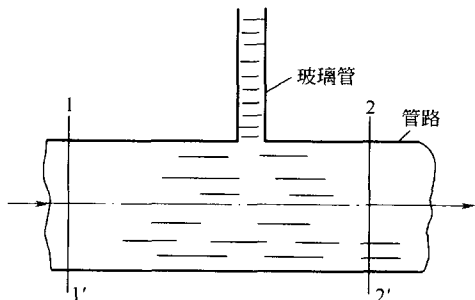


图 1-1 流动流体静压力的表现

既然流动着的流体内部任一处都具有一定的静压力，那么正要越过图 1-1 的截面 1-1' 进入系统去的流体，势必受到截面 1-1' 处的流体的压力作用。这就需要截面 1-1' 外边的流体做

一定的功，以克服这个压力的作用，才能把流体推进系统里去。于是越过截面 1-1' 的流体便带着一定的能量进入系统里去，这部分由功转变出来的能量称为静压能。

设质量为 $m(\text{kg})$ 、体积为 $V_1(\text{m}^3)$ 的流体通过截面 1-1'，把该流体推进此截面所需的作用力为 $p_1 S_1$ ，而流体通过此截面所走的距离为 V_1 / S_1 ，则流体带入选系统的静压能为

$$\text{输入的静压能} = p_1 S_1 \frac{V_1}{S_1} = p_1 V_1 \quad \text{N} \cdot \text{m} \text{ 或 } \text{J}$$

对 1kg 流体，则

$$\text{输入的静压能} = \frac{p_1 V_1}{m} = \frac{p_1}{\rho_1} \quad \text{J/kg}$$

同理, 1kg 流体离开系统时输出的静压能为 p_2 / ρ_2 , 其单位也为 J/kg。
因此, mkg 流体的总机械能为

$$mgz + \frac{1}{2}mu^2 + pV \quad \text{J}$$

1kg 流体的总机械能为

$$zg + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} \quad \text{J/kg}$$

1.2.3.2 伯努利方程式

(1) 伯努利方程式

在流体输送过程中, 主要考虑各种形式机械能的转换。应用能量守恒定律, 可以列出 1kg 流体的机械能衡算式, 如图 1-1, 流体由截面 1-1' 流向截面 2-2', 则

$$z_1 g + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{u_1^2}{2} = z_2 g + \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{u_2^2}{2}$$

将上式用于不可压缩流体 (ρ 为常数), 即得到伯努利方程式。

$$z_1 g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = z_2 g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} \quad (1-9)$$

式(1-9)说明流体在流动过程中, 每 kg 流体的总机械能为一常数。式中未考虑液体内部由于有摩擦力存在而损失掉一部分能量, 因此称为理想液体的伯努利方程式。

除了上述三项机械能被流体带进和带出流动系统外, 流体还有两种机械能进入或离开这个系统。

外加能量——如果在所讨论的系统中, 安装有流体输送机械 (如泵), 则这种机械便把机械能输入流体中。1kg 流体从输送机械所获得的机械能, 称为外加功, 以 E 表示, 其单位为 J/kg。

损失能量——实际流体流过管路时, 发生摩擦, 一部分机械能转化为热能。不可压缩流体在输送过程中, 热能不能自行转化为机械能, 这部分能量一经转化为热能, 就不能再为流体输送所利用, 从输送角度来看就成为损失的能量。在作机械能衡算时, 这部分能量看作是从流体输到外界的能量, 称为损失能量。1kg 流体的损失能量以 E' 表示, 其单位为 J/kg。

实际液体有能量的损失, 而且管路系统中经常安装输送机械, 于是可列出实际液体的伯努利方程式。

$$z_1 g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + E = z_2 g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + E' \quad (1-10)$$

式(1-9) 及式(1-10) 都是伯努利方程式, 它们是计算流体流动问题的重要

的方程式。

(2) 伯努利方程式的讨论

① 式(1-10)表明,若没有外加能量和损失能量,流体在各截面上所具有的总机械能相等,但各截面上的每一种形式的机械能不一定相等,各种形式的机械能可以相互转换。

② 由式(1-10)可以看出,若管路系统有损失能量但无外加能量,则上游截面的总机械能必定比下游截面的总机械能大。换句话说,流体自流时,只能从高机械能处向低机械能处流动。若要使流体从低机械能处向高机械能处流动,必须加入外加功,或设法提高上游处某一形式的机械能,使上游总机械能大于下游总机械能后,流动过程才能实现。

③ 如果流体是静止的,则 $u=0$; 没有运动,自然没有阻力,即 $E'=0$; 由于流体静止,也就不会有外功加入,即 $E=0$, 于是式(1-10)变成

$$z_1 g + \frac{p_1}{\rho} = z_2 g + \frac{p_2}{\rho} \quad (1-11)$$

式(1-11)与式(1-10)无异,因此也可将式(1-11)看成静力学基本方程式的另一种表达式,它表明静止流体内任一点的机械能总和是常数。由此可见,伯努利方程式除表示流体的流动规律外,还表示了流体静止状态的规律,而流体的静止状态只是流动状态的一种特殊形式。

④ 伯努利方程式是依据不可压缩流体的能量平衡而得出的,故只适用于液体。对于气体,若所取系统两截面间的压力变化小于 20% [即 $(p_1 - p_2)/p_1 < 20\%$], 仍可用式(1-10)和式(1-11)进行计算,但式中的密度应取平均值。这种处理方法所导致的误差,在工程计算上是允许的。

⑤ 式(1-10)中 E 是输送设备对单化质量流体所做的有效功,是决定输送设备的重要依据。单位时间输送设备所作的有效功称为有效功率,以 N' 表示,即

$$N' = EG_s \quad \text{J/s 或 W} \quad (1-12)$$

⑥ 若以受到单位地心引力(即单位重力)的流体作为能量平衡的基准,则将式(1-10)各项除以 g , 可得

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{E}{g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{E'}{g}$$

令

$$H = \frac{E}{g} \quad h' = \frac{E'}{g}$$

则

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + h' \quad (1-13)$$