



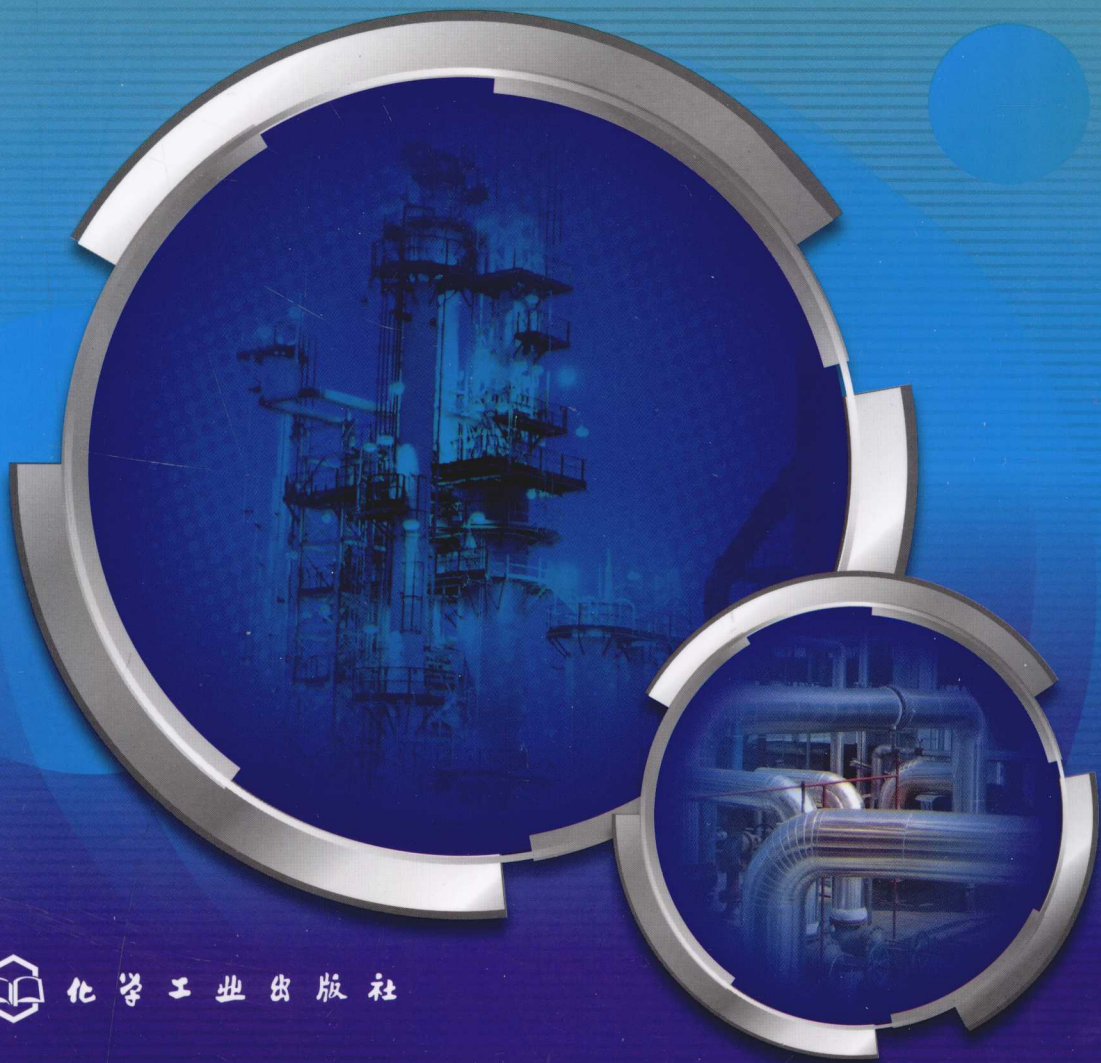
职业技能鉴定培训教程

# 水煤气工

SHUIMEIQIGONG

中国氮肥工业协会

组织编写



化学工业出版社

职业技能鉴定培训教程

# 水 煤 气 工

中国氮肥工业协会 组织编写



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是煤化工企业造气专业技术人员培训教材。本书结合编者日常工作中积累的实际经验,以安全生产为前提,以节能降耗为主旨,全面地介绍了固体煤原料气化原理、工艺流程、操作方法、安全技术、设备选配以及工艺管道配置,详细讲解了安全生产技术和生产中的事故判断处理,同时对基础性的化工知识、设备构造、节能降耗途径和平衡计算等作了必要的叙述。

本书可供煤化工企业造气专业技术人员、技术工人学习和参考。

#### 图书在版编目(CIP)数据

水煤气工/中国氮肥工业协会组织编写. —北京:  
化学工业出版社, 2010. 2

职业技能鉴定培训教程

ISBN 978-7-122-07577-2

I. 水… II. 中… III. 水煤气-职业技能鉴定-教材  
IV. TQ542. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 004470 号

---

责任编辑: 李玉晖

文字编辑: 陈 元

责任校对: 周梦华

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 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$  字数 416 千字 2010 年 6 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: 45.00 元

版权所有 违者必究

## 《职业技能鉴定培训教程 水煤气工》编审委员会

主任委员：刘淑兰

委 员：刘淑兰 孙华田 辛君一 邢一德 周大明  
曹占高 余 一 梁锡晖 江 文 杨春昇  
於子方 杨本华 李玉顺 徐雨新 孙胜林  
辛鸿礼

本书主编：孙华田

编写人员：（按章节顺序排序）

孙华田 第1章、第9章、第10章、第12章

邢一德、周大明 第2章

辛君一 第3~8章、第14章

辛君一、邢一德 第11章

邢一德 第13章

校审人员：曹占高 余 一 梁锡晖 江 文 杨春昇 於子方  
周大明 杨本华 李玉顺 徐雨新 孙胜林 辛鸿礼

# 前 言

根据人力资源和社会保障部《关于大力推进职业资格证书制度建设的若干意见》和中共中央办公厅、国务院办公厅《关于进一步加强高技能人才工作的意见》精神，为搞好氮肥行业化工特有工种职工的职业技能培训与鉴定，中国氮肥工业协会和中国氮肥工业协会化工特有工种职业技能鉴定站组织行业专家和工程技术人员编写了本教程。

本教程以《中华人民共和国职业技能鉴定规范》中水煤气工考核大纲（试用）为依据，以客观反映现阶段本职业的科技进步和对从业人员在工作内容、操作技能和知识水平等方面的要求为目标，组织有关专家和工程技术人员历经两年的时间共同完成。

本教程根据相关理论知识，结合编写人员日常工作中积累的经验，以安全生产为前提，以节能降耗为主旨，对固体原料气化原理、工艺流程、操作方法、安全技术和设备选配以及工艺管道配置等作了较为全面的介绍。其中安全生产技术和事故判断处理介绍较为详细，对基础性的化工知识、部分设备构造、节能降耗途径和物料衡算等作了必要的叙述。本书适用于化工、煤化工企业水煤气工的培训。

本书在编写过程中广泛征求了业内专家和工程技术人员意见并进行了多次修改，但由于编写人员水平有限，时间仓促，不足之处在所难免，希望有关专家、工程技术人员、生产管理人员及广大职工提出宝贵意见，以便进一步补充和完善。

**《职业技能鉴定培训教程 水煤气工》编审委员会  
2009 年 12 月**

# 目 录

## 第1章 基础理论及化工基础知识 ..... 1

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 1.1 化工过程的几个基本概念 .....           | 1  |
| 1.1.1 物料衡算 .....                | 1  |
| 1.1.2 能量衡算 .....                | 1  |
| 1.1.3 平衡关系 .....                | 2  |
| 1.1.4 过程速率 .....                | 2  |
| 1.2 单位制及单位换算 .....              | 2  |
| 1.3 流体 .....                    | 4  |
| 1.3.1 流体的密度和压力(压强) .....        | 4  |
| 1.3.2 流体静力学基本方程 .....           | 7  |
| 1.3.3 流体动力学基本概念 .....           | 10 |
| 1.3.4 伯努利方程式 .....              | 12 |
| 1.3.5 流体阻力 .....                | 14 |
| 1.4 流体输送机械 .....                | 19 |
| 1.4.1 离心泵 .....                 | 19 |
| 1.4.2 齿轮泵 .....                 | 22 |
| 1.4.3 离心通风机、鼓风机 .....           | 23 |
| 1.5 旋风分离器 .....                 | 26 |
| 1.6 传热及传热设备 .....               | 28 |
| 1.6.1 传热的基本方式 .....             | 28 |
| 1.6.2 强化传热的途径与热绝缘方法 .....       | 29 |
| 1.7 带控制点工艺流程图 .....             | 31 |
| 1.7.1 图幅、比例与图线 .....            | 31 |
| 1.7.2 设备的表示方法 .....             | 31 |
| 1.7.3 管路的表示方法 .....             | 32 |
| 1.7.4 管件与阀门的表示方法 .....          | 32 |
| 1.7.5 仪表控制点的表示方法 .....          | 32 |
| 1.7.6 地面及楼面的表示方法 .....          | 32 |
| 1.8 安装管道注意的问题 .....             | 36 |
| 1.8.1 管路的热胀冷缩 .....             | 36 |
| 1.8.2 安装管路的基本原则及注意的<br>问题 ..... | 37 |

## 第2章 合成氨原料气制备方法 ..... 38

|                    |    |
|--------------------|----|
| 2.1 固定层间歇气化法 ..... | 38 |
|--------------------|----|

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 2.2 电解水法 .....                  | 38 |
| 2.3 重油气化法 .....                 | 39 |
| 2.4 焦炉气为原料制取合成氨原料气 .....        | 39 |
| 2.5 天然气为原料制取合成氨原料气 .....        | 39 |
| 2.5.1 连续蒸汽转化催化法 .....           | 39 |
| 2.5.2 间歇蒸汽催化转化法 .....           | 40 |
| 2.6 新型煤气化技术介绍 .....             | 40 |
| 2.6.1 灰熔聚煤气化技术 .....            | 40 |
| 2.6.2 新型多喷嘴对置式水煤浆气化<br>技术 ..... | 41 |
| 2.6.3 恩德粉煤气化技术 .....            | 42 |
| 2.6.4 壳牌(Shell)粉煤气化技术 .....     | 42 |

## 第3章 固定层间歇气化法的基本 理论 ..... 44

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 3.1 固定层煤气炉的气化原料 .....           | 44 |
| 3.1.1 煤的形成 .....                | 44 |
| 3.1.2 焦炭的形成 .....               | 44 |
| 3.1.3 型煤 .....                  | 44 |
| 3.2 固定层煤气炉气化原料的质量要求 .....       | 45 |
| 3.2.1 气化原料的选择 .....             | 45 |
| 3.2.2 气化原料的物化特性 .....           | 45 |
| 3.3 燃料气化的化学过程 .....             | 51 |
| 3.3.1 煤气炉内燃料的分层 .....           | 51 |
| 3.3.2 煤气炉内的化学反应 .....           | 53 |
| 3.4 间歇式气化法制取半水煤气的工作<br>循环 ..... | 56 |
| 3.4.1 循环中各阶段的作用 .....           | 57 |
| 3.4.2 循环阶段的时间分配原则 .....         | 58 |
| 3.4.3 循环时间的选择 .....             | 60 |
| 3.5 制取半水煤气的工艺条件 .....           | 60 |
| 3.5.1 气化效率 .....                | 60 |
| 3.5.2 工艺条件的选择 .....             | 62 |

## 第4章 固定层间歇法煤气制取设备和 工艺流程的选择 ..... 66

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 4.1 设备工艺流程的确立原则 ..... | 66 |
|-----------------------|----|

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 4.2 固定层间歇法煤气生产设备流程的选择 ..... | 67 |
| 4.3 工艺管道的配置与通径选择 .....      | 69 |
| 4.4 附属设备的选择与配置 .....        | 70 |
| 4.5 工艺控制阀门的安装与选择 .....      | 75 |

## 第5章 固定层间歇式煤气炉的正常操作控制 .....

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 5.1 炭层高度的控制 .....          | 78  |
| 5.2 气化层的控制 .....           | 80  |
| 5.3 影响气化层均匀分布的因素 .....     | 86  |
| 5.4 煤气炉负荷的选择 .....         | 87  |
| 5.5 煤气系统的开、停车操作 .....      | 88  |
| 5.5.1 煤气炉的点火与烘炉 .....      | 89  |
| 5.5.2 惰性气体的制取和置换 .....     | 89  |
| 5.5.3 煤气炉快速启用操作法 .....     | 90  |
| 5.5.4 煤气系统停车和熄火 .....      | 91  |
| 5.6 半水煤气氢氮比的调节 .....       | 91  |
| 5.6.1 煤气制取过程中的几种加氮方式 ..... | 92  |
| 5.6.2 半水煤气氢氮比的调节方法 .....   | 92  |
| 5.6.3 氢氮比调节中应注意的问题 .....   | 93  |
| 5.6.4 上、下吹加氮的特点 .....      | 93  |
| 5.7 煤气炉的操作依据 .....         | 94  |
| 5.7.1 温度监测 .....           | 94  |
| 5.7.2 压力监测 .....           | 97  |
| 5.7.3 空气鼓风机出口压力及电机电流 ..... | 98  |
| 5.7.4 入炉前蒸汽压力和温度 .....     | 98  |
| 5.7.5 炉条电机电流 .....         | 98  |
| 5.7.6 气体成分 .....           | 99  |
| 5.7.7 灰渣质量 .....           | 99  |
| 5.7.8 气柜高度 .....           | 101 |
| 5.7.9 炭层高度和料面形态 .....      | 101 |
| 5.7.10 炉面火色及探火、试火情况 .....  | 101 |
| 5.8 不同燃料操作条件的变化 .....      | 102 |
| 5.9 原料品种更替时的注意事项 .....     | 104 |
| 5.10 煤气炉运行工艺的确立和调整优化 ..... | 105 |

## 第6章 型煤的制取和气化操作 .....

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 6.1 型煤制取的质量保障 ..... | 108 |
| 6.2 型煤的气化操作 .....   | 109 |
| 6.2.1 腐殖酸钠煤棒 .....  | 109 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 6.2.2 煤球质量要求 ..... | 111 |
| 6.2.3 腐殖酸钠煤球 ..... | 112 |
| 6.2.4 石灰碳化煤球 ..... | 113 |

## 第7章 造气微机集成液压控制系统 .....

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 7.1 集成液压控制系统的工作原理 ..... | 115 |
| 7.2 供油泵站系统 .....        | 115 |
| 7.2.1 供油系统的工作流程 .....   | 115 |
| 7.2.2 油泵的开车操作 .....     | 116 |
| 7.2.3 齿轮油泵的操作要点 .....   | 116 |
| 7.2.4 齿轮油泵的正确切换 .....   | 117 |
| 7.3 液压油的选择 .....        | 117 |
| 7.4 油缸液压方式的选择 .....     | 118 |
| 7.4.1 普通接法 .....        | 118 |
| 7.4.2 差动接法 .....        | 119 |
| 7.5 蓄能器的设置 .....        | 119 |
| 7.6 液压系统的安全注意事项 .....   | 120 |

## 第8章 煤气生产中的故障判断及处理 .....

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 8.1 煤气炉操作中常见的不正常现象及事故处理 .....        | 121 |
| 8.1.1 煤气炉结大块、结疤 .....                | 121 |
| 8.1.2 塌炭和漏炭 .....                    | 122 |
| 8.1.3 燃料层吹翻 .....                    | 123 |
| 8.1.4 吹凹、风洞和灭火现象 .....               | 124 |
| 8.1.5 气化层偏移和倾斜 .....                 | 124 |
| 8.1.6 灰渣可燃物含量超标 .....                | 124 |
| 8.1.7 上行、下行煤气温度指标超高 .....            | 125 |
| 8.1.8 入炉气化剂发生故障 .....                | 126 |
| 8.1.9 吹风阶段烟窗冒白烟 .....                | 126 |
| 8.1.10 气柜猛升 .....                    | 126 |
| 8.1.11 气柜猛降 .....                    | 127 |
| 8.1.12 停炉时炉面火焰大或大量冒火 .....           | 127 |
| 8.1.13 半水煤气中二氧化碳含量高，但炉内出现结疤结大块 ..... | 128 |
| 8.1.14 气体洗涤塔出气温度高 .....              | 128 |
| 8.1.15 半水煤气中氧含量超标 .....              | 128 |
| 8.1.16 入炉蒸汽带水 .....                  | 129 |
| 8.1.17 下行煤气带出物过多 .....               | 129 |
| 8.1.18 吹风阶段带出物过量和颗粒过大 .....          | 130 |
| 8.1.19 吹风阶段系统阻力增高 .....              | 130 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 8.1.20 制气阶段系统阻力增高 .....               | 131 |
| 8.1.21 煤气倒流事故 .....                   | 131 |
| 8.1.22 断电、断油、断水、断汽 .....              | 132 |
| 8.2 常见的设备故障 .....                     | 133 |
| 8.2.1 煤气炉常见故障 .....                   | 133 |
| 8.2.2 炉条机及排灰装置故障 .....                | 133 |
| 8.2.3 夹套锅炉 .....                      | 134 |
| 8.2.4 废热锅炉常见故障 .....                  | 135 |
| 8.2.5 旋风除尘器 .....                     | 135 |
| 8.2.6 气柜 .....                        | 135 |
| 8.2.7 空气鼓风机 .....                     | 136 |
| 8.2.8 液压阀门 .....                      | 136 |
| 8.2.9 集成油压系统常见故障 .....                | 137 |
| <b>第9章 煤气生产须严格控制的问题</b> ..            | 139 |
| 9.1 入炉风量及影响风量的因素 .....                | 139 |
| 9.1.1 入炉风量 .....                      | 139 |
| 9.1.2 影响风机风量的因素 .....                 | 140 |
| 9.2 入炉蒸汽总量, 上、下吹时间及蒸汽<br>用量 .....     | 142 |
| 9.3 上下行煤气、夹套上方空层和灰仓两点<br>温度 .....     | 143 |
| 9.4 下灰的数量和质量 .....                    | 144 |
| 9.5 工艺控制指标的制定与考核 .....                | 145 |
| 9.6 各类人员主要工艺参数调节幅度和<br>范围 .....       | 146 |
| 9.7 煤气系统主要设备部件及阀门管路的<br>选配 .....      | 146 |
| <b>第10章 造气工段的能耗分析及<br/>节能途径</b> ..... | 152 |
| 10.1 提高燃料利用率的途径 .....                 | 152 |
| 10.2 降低蒸汽消耗的途径 .....                  | 156 |
| 10.3 降低电耗途径 .....                     | 157 |
| 10.4 主要工艺指标与消耗的关系 .....               | 159 |
| 10.4.1 氢氮比 .....                      | 159 |
| 10.4.2 有效气体含量 .....                   | 159 |
| 10.4.3 氧含量 .....                      | 160 |
| 10.4.4 甲烷含量 .....                     | 161 |
| 10.4.5 空气湿度 .....                     | 162 |
| 10.5 煤气炉负荷与燃料煤、蒸汽消耗的<br>关系 .....      | 162 |
| 10.6 循环时间与两煤消耗的关系 .....               | 164 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| <b>第11章 造气工段的安全生产<br/>技术</b> .....     | 166 |
| 11.1 煤气炉日常安全操作 .....                   | 166 |
| 11.1.1 正常开车 .....                      | 166 |
| 11.1.2 正常停车 .....                      | 166 |
| 11.1.3 人工加炭 .....                      | 167 |
| 11.2 煤气中毒的预防 .....                     | 167 |
| 11.2.1 一氧化碳 .....                      | 167 |
| 11.2.2 硫化氢 .....                       | 168 |
| 11.2.3 一般的窒息性气体 .....                  | 169 |
| 11.2.4 煤气中毒的预防 .....                   | 169 |
| 11.2.5 几种常见的防毒面具 .....                 | 169 |
| 11.3 防火及防爆 .....                       | 171 |
| 11.3.1 物质燃烧和爆炸的特性 .....                | 171 |
| 11.3.2 防火、防爆措施 .....                   | 172 |
| 11.3.3 火灾的预防 .....                     | 175 |
| 11.3.4 逃生和自救 .....                     | 176 |
| 11.4 造气工段的安全装置 .....                   | 177 |
| 11.5 造气工段的火源 .....                     | 178 |
| 11.6 煤气生产系统动火作业的安全<br>措施 .....         | 178 |
| 11.7 造气工段易发爆炸的部位 .....                 | 180 |
| 11.7.1 炉上爆炸 .....                      | 180 |
| 11.7.2 炉底爆炸 .....                      | 181 |
| 11.7.3 空气鼓风机和空气总管<br>爆炸 .....          | 181 |
| 11.7.4 夹套锅炉爆炸 .....                    | 182 |
| 11.7.5 气柜爆炸 .....                      | 183 |
| 11.7.6 气体洗涤塔爆炸 .....                   | 183 |
| 11.7.7 下行煤气管道爆炸 .....                  | 183 |
| 11.7.8 吹风气总管爆炸 .....                   | 183 |
| 11.8 造气工段安全操作规程 .....                  | 184 |
| 11.9 造气工段的安全制度 .....                   | 185 |
| 11.9.1 运行 .....                        | 185 |
| 11.9.2 开车 .....                        | 186 |
| 11.9.3 停车 .....                        | 186 |
| 11.9.4 紧急处理 .....                      | 186 |
| <b>第12章 固定层气化方式的热量和物料<br/>衡算</b> ..... | 187 |
| 12.1 热量损失 .....                        | 187 |
| 12.2 煤气生产过程中的物料概算基础 .....              | 188 |
| 12.2.1 气化指标的计算公式 .....                 | 188 |

|                                    |     |                                      |     |
|------------------------------------|-----|--------------------------------------|-----|
| 12.2.2 固定层间歇法制取半水煤气计算<br>举例 .....  | 190 | 减少 .....                             | 218 |
| 12.3 煤气生产过程中的物料和热量<br>衡算 .....     | 193 | 13.5 吹风气回收系统的控制指标 .....              | 218 |
| 12.3.1 吹风阶段的计算 .....               | 195 | 13.6 吹风气回收系统的安全生产技术 .....            | 219 |
| 12.3.2 蒸汽吹送阶段的计算 (制气<br>阶段) .....  | 198 | 13.7 吹风气回收系统的物料平衡计算和<br>热量平衡计算 ..... | 220 |
| 12.3.3 总过程计算 .....                 | 201 | 13.7.1 燃烧所需空气量的计算 .....              | 220 |
| 12.3.4 配气计算 .....                  | 204 | 13.7.2 燃烧产物计算 .....                  | 220 |
| 12.3.5 消耗定额 (以吨氨为基准) .....         | 205 | 13.7.3 混合燃气的燃烧产物计算 .....             | 221 |
| 12.3.6 主要设备工艺计算 .....              | 206 | 13.7.4 燃烧产物及空气的焓 (即显热)<br>计算 .....   | 222 |
| 12.3.7 气体体积换算 (工况/标况) .....        | 207 | 13.7.5 燃烧温度 .....                    | 222 |
| 12.3.8 气体重量体积的计算 .....             | 207 | 13.7.6 空气过剩系数 .....                  | 223 |
| 12.3.9 气体的浓度表示法与换算 .....           | 208 | 13.7.7 燃烧举例计算 .....                  | 223 |
| 12.3.10 不同温度下空气的密度 .....           | 209 |                                      |     |
| <b>第13章 吹风气回收装置</b> .....          | 211 | <b>第14章 煤气生产的日常生产管理</b> .....        | 227 |
| 13.1 工艺流程概述 .....                  | 211 | 14.1 管理机构 and 人员配置 .....             | 228 |
| 13.1.1 流程特点分析 .....                | 211 | 14.2 煤气炉运行工艺的管理 .....                | 229 |
| 13.1.2 设备配置形式 .....                | 214 | 14.3 煤气生产的设备管理 .....                 | 230 |
| 13.2 吹风气回收系统的正常操作 .....            | 216 | 14.4 考核章程和制度 .....                   | 231 |
| 13.3 吹风气回收系统原始开、停车 .....           | 216 | 14.5 操作记录 .....                      | 233 |
| 13.3.1 吹风气回收装置的开车顺序与<br>步骤 .....   | 216 | <b>附录1 常用名词和术语</b> .....             | 234 |
| 13.3.2 吹风气回收装置的停车操作 .....          | 217 | <b>附录2 化工企业安全生产禁令</b> .....          | 241 |
| 13.4 吹风气回收系统不正常现象的判断<br>及处理 .....  | 217 | <b>附录3 常用单位换算</b> .....              | 243 |
| 13.4.1 燃烧炉温度下降及燃烧炉温度难<br>以维持 ..... | 217 | <b>附录4 常用物质理化特性</b> .....            | 246 |
| 13.4.2 燃烧炉温度急剧上升 .....             | 218 | <b>参考文献</b> .....                    | 260 |
| 13.4.3 吹风气回收系统阻力增大 .....           | 218 |                                      |     |
| 13.4.4 吹风气回收系统副产蒸汽量                |     |                                      |     |

# 第1章 基础理论及化工基础知识

## 1.1 化工过程的几个基本概念

在分析单元操作或工艺过程中，经常要用物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率等概念来反映物料和能量的变化规律。探索化工过程理论上的可能性、技术上的可行性以及经济上的合理性，这是基本的出发点。

### 1.1.1 物料衡算

物料衡算是以质量守恒定律为基础，用来分析和计算化工过程中物料的进出量以及组成变化的定量关系，确定原料消耗定额、产品的产量和产率，还可以用来核定设备的生产能力，确定设备的工艺尺寸，发现生产中所存在的问题，从而找到解决方案，所以它是化工计算的基础。

进行物料衡算时，首先根据需要对衡算对象人为地划定一个衡算范围。这样一个范围称为“控制体”，并用箭头在控制体表面标出各股物料进、出数量和组成等；其次要规定一个衡算基准，衡算基准要根据实际需要来决定，在连续操作中以单位时间为基准较为方便；对于产品量已确定，则可用单位产品量为基准，由此来衡算出其他各股物料量。必须注意的是参与衡算的物料量要以质量或物质的量表示，一般不宜用体积表示，这是由于体积尤其气体的体积是随着温度、压强的变化而变化。

若进入控制体的各股物料总量为 $\sum G_i$ ，从控制体中排出的各股物料总量为 $\sum G_o$ ，控制体内的物料的积累量为 $G_a$ ，根据质量守恒定律应有

$$\sum G_i = \sum G_o + G_a$$

对于连续操作，进、出控制体的各股物料量恒定，在控制体内任一位置处物料的各参数（温度、压强、组成、流速等）都不随时间而变，这样的操作过程称为定态过程。对定态过程，控制体内无物料积累， $G_a = 0$ ，则物料衡算式为

$$\sum G_i = \sum G_o$$

物料衡算中控制体的概念同样可以用到能量衡算或动量衡算中去。

### 1.1.2 能量衡算

能量衡算的依据是能量守恒定律。根据此定律，输入控制体的能量应等于从控制体输出的能量与控制体内积累的能量之和。

能量可以随物料一起输入和输出，如物料自身具有的内能、动能和位能等。也可以通过一些设备输入或输出，如通过泵或压缩机给流体增加机械能，通过器壁向系统输入热量以及

从设备损失到周围介质中的热量等。

能量的形式很多，在化工生产中用到的最多的是热能和机械能，热量衡算则是化工计算中一个常用的工具。对定态操作系统，在机械能等其他能量恒定的条件下，若输入控制体的热量为 $\sum Q_i$ ，输出的热量为 $\sum Q_o$ ，控制体的热损失为 $Q_a$ ，该项控制体的热量衡算式为：

$$\sum Q_i = \sum Q_o + Q_a$$

通过热量衡算可以了解热量的利用和损失情况，确定过程中需要加入的热量。这是生产工艺条件的确定、设备设计不可缺少的环节，也是评价技术经济效果的重要工具。

### 1.1.3 平衡关系

任何一个物理或化学变化过程，在一定条件下必然沿着一定方向进行，直至达到动态平衡为止。这类平衡现象在化工生产中很多，如化学反应中的反应平衡、煤气生产过程中的物料平衡和热量平衡。

描述化工过程中的物系平衡关系的定律有热力学第二定律、亨利定律、拉乌尔定律以及化学平衡定律等。必须指出，任何过程的平衡状态都是在一定条件下达到的暂时、相对统一的状态。一旦条件变化，原来的平衡就要被破坏，直到建立起新的平衡。利用这一原理可以使设备发挥最大的效能，因此平衡关系也为设备参数的设计提供了理论依据。

### 1.1.4 过程速率

平衡关系只能说明过程的方向和限度，而不能确定过程进行的快慢，过程进行的快慢只能采用过程速率来描述。过程速率受诸多因素影响，目前还不能用一个简单的数学式来表示化学过程速率与其影响因素之间的关系。所以，目前过程速率是以过程推动力与过程阻力的比值来表示的，即

$$\text{过程速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}}$$

不同的过程推动力有不同的含义，如冷、热两流体之间传热推动力应为冷、热两流体之间的温度差，流体流动的推动力为势能差、动能差、静压能差等，而物质传递的推动力则为浓度差。无论是什么含义，它们有一个共同点，即其过程达到平衡时推动力均为零。过程阻力较为复杂，应根据具体过程进行分析。

## 1.2 单位制及单位换算

在生产过程中，有较多的化工计算，涉及多种物理量。如表示操作状态的有压强、温度等；表示物料性质的有密度、黏度、比热容等；表示设备几何尺寸的有长度、面积、管径等。要说明一个物理量的大小仅用数字是不够的，还必须与单位结合起来。我国实行法定计量单位。

化工生产中所用的物理量分为两类：一、基本量，人为的选定几个彼此独立的物理量，如长度、时间等，量度这些基本量大小的单位称基本单位；二、导出量，即基本量以外的其他物理量，可通过物理量之间的定义或定律从基本量导出来，其所用的单位称为导出单位。例如速度为路程与时间之比，可由长度（m）和时间（s）两基本量导出，其单位 m/s 为导出单位。

国际计量会议制定的一种国际上统一的国际单位制，其国际代号为 SI，单位是由基本

单位、辅助单位和具有专门名称的导出单位构成的,见表1-1、表1-2;国际单位制中用于构成十进倍数和分数单位的词头,列于表1-3中。

表 1-1 国际单位制的基本单位

| 量的名称 | 单位名称   | 单位符号 | 量的名称  | 单位名称  | 单位符号 |
|------|--------|------|-------|-------|------|
| 长度   | 米      | m    | 热力学温度 | 开[尔文] | K    |
| 质量   | 千克(公斤) | kg   | 物质的量  | 摩[尔]  | mol  |
| 时间   | 秒      | s    | 发光强度  | 坎[德拉] | cd   |
| 电流   | 安[培]   | A    |       |       |      |

表 1-2 国际单位制中具有专门名称的导出单位

| 量的名称      | 单位名称  | 符号          | 单位符号             |
|-----------|-------|-------------|------------------|
| 频率        | 赫[兹]  | Hz          | $s^{-1}$         |
| 力,重力      | 牛[顿]  | N           | $kg \cdot m/s^2$ |
| 压力(压强),应力 | 帕[斯卡] | Pa          | $N/m^2$          |
| 能量,功,热    | 焦[耳]  | J           | $N \cdot m$      |
| 功率,辐射通量   | 瓦[特]  | W           | J/s              |
| 摄氏温度      | 摄氏度   | $^{\circ}C$ |                  |

注:1. 摄氏温度是按式  $t = T - 273.15$  定义的,式中  $t$  为摄氏温度,  $T$  为热力学温度。

2. 本表只列出本书常用单位。

表 1-3 用于构成十进倍数和分数单位的词头

| 所表示的因数 | 词头名称 | 词头符号 | 所表示的因数    | 词头名称 | 词头符号  |
|--------|------|------|-----------|------|-------|
| $10^6$ | 兆    | M    | $10^{-1}$ | 分    | d     |
| $10^3$ | 千    | k    | $10^{-2}$ | 厘    | c     |
| $10^2$ | 百    | h    | $10^{-3}$ | 毫    | m     |
| $10^1$ | 十    | da   | $10^{-6}$ | 微    | $\mu$ |

注:只列出本书常用词头。

法定计量单位是以国际单位制的单位为基础,根据我国的情况,适当增加了一些其他单位构成的。国家选定的非国际单位制单位见表1-4。另外,CGS制与工程单位制的基本单位如表1-5所示。工程单位制中以“力”为基本量,用符号 kgf 表示。

表 1-4 国家选定的非国际单位制单位

| 量的名称 | 单位名称 | 单位符号     | 量的名称   | 单位名称 | 单位符号           |
|------|------|----------|--------|------|----------------|
| 时间   | 分    | min      | 平面角    | 度    | ( $^{\circ}$ ) |
|      | [小]时 | h        | 旋转角度   | 转/每分 | r/min          |
|      | 天[日] | d        | 质量     | 吨    | t              |
| 平面角  | 秒    | ( $''$ ) | 原子质量单位 |      | u              |
|      | 分    | ( $'$ )  | 体积     | 升    | L(l)           |

表 1-5 CGS制与工程单位制的基本单位

| 项 目  | CGS制 |    |    |             | 工程制 |     |    |             |
|------|------|----|----|-------------|-----|-----|----|-------------|
| 量的名称 | 长度   | 质量 | 时间 | 温度          | 长度  | 力   | 时间 | 温度          |
| 单位名称 | 厘米   | 克  | 秒  | 摄氏度         | 米   | 公斤力 | 秒  | 摄氏度         |
| 单位符号 | cm   | g  | s  | $^{\circ}C$ | m   | kgf | s  | $^{\circ}C$ |

同一物理量若用不同单位度量时,其数值需相应的改变。这种换算称为单位换算。单位换算时,需要换算因数。化工中常用的换算因数可从本书附录中查得。

若物体受地球引力作用产生  $g=9.80665\text{m/s}^2$  的重力加速度,则作用于质量为  $m=1\text{kg}$  的物体上的重力为  $F=mg=1\times 9.80665\text{N}$ 。

物体在重力场中所受重力,就是物体的重量。因此,工程单位制中把 SI 中的  $9.80665\text{N}$  重量,作为其  $1\text{kgf}$  重,故有  $1\text{kgf}=9.80665\text{N}$  重量,由于质量为  $1\text{kg}$  物体的重量为  $1\text{kgf}$ ,所以工程单位制中的重量与 SI 制中的质量数值相等。

**例 1-1** 通用气体常数  $R=0.08206\text{atm}\cdot\text{m}^3/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ ,试用法定单位  $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$  表示。

**解:** 已知  $1\text{L}=10^{-3}\text{m}^3$ ,  $1\text{atm}=1.013\times 10^5\text{Pa}$ ,  $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2=1\text{N}\cdot\text{m}/\text{m}^3=1\text{J}/\text{m}^3$

因此  $R=0.08206\times 10^{-3}\times 1.013\times 10^5=8.314\text{m}^3\cdot\text{Pa}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

$R=8.314\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

## 1.3 流体

气体和液体统称为流体。在化工生产中所处理的物料有很多是流体。根据生产需求,往往需要将这些流体按照生产程序从一个设备输送到另一个设备。除了流体输送外,化工生产中的传热、传质过程以及化学反应大都是在流体流动下进行的。流体流动状态对这些单元操作有着很大的影响。

流体的体积如果不随压力及温度的变化,这种流体称为不可压缩流体;如果随着压力和温度的变化,则称为可压缩流体。实际流体都是可压缩的。由于液体的体积随着压力及温度变化很小,所以一般把它当作不可压缩流体;当压力及温度变化时气体的体积会有很大的变化,应当属于可压缩流体。但是,如果压力和温度变化率很小时,气体通常也可以看作不可压缩流体处理。

### 1.3.1 流体的密度和压力(压强)

流体的静止是流体运动的一种特殊形式。研究流体流动问题,一般先从静止流体这个特殊事物开始。流体静力学的任务是研究静止流体的内部压力变化规律。

#### (1) 密度

物质的质量除以体积简称为密度。

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

式中,  $\rho$  为流体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $m$  为流体的总质量,  $\text{kg}$ ;  $V$  为流体的总体积,  $\text{m}^3$ 。

液体密度:一般由实验室测定,在运算中可以从物性数据手册中查取。温度对液体的密度有一定的影响,例如,  $277\text{K}$  水的密度为  $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $293\text{K}$  水的密度为  $998.2\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $373\text{K}$  水的密度为  $958.4\text{kg}/\text{m}^3$ 。因此,在查用密度数值时,应注意所对应的温度。压强对液体的密度影响较小,一般可以忽略。

在一般工程计算中,当温度变化不大时,把密度当作常数。例如当温度不太高时,取水的密度为  $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ;水银的密度为  $13600\text{kg}/\text{m}^3$ 。

化工生产中经常遇到液体混合物,其密度的准确值需由实验测定,也可选用经验公式估

算。纯液体的密度可通过实验测得。不同单位制，密度的单位和数值都不同。液体混合物的密度，可选用经验公式估算。

气体密度：气体具有可压缩性及膨胀性，其密度随温度和压力有较大的变化。在一般温度和压力下，气体的密度常用理想气体状态方程式近似计算。

理想气体状态方程式  $pV=nRT=(m/M)RT$

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

式中  $p$ ——气体的压力，kPa；

$T$ ——气体的温度，K；

$V$ ——气体的体积， $\text{m}^3$ ；

$M$ ——气体的摩尔质量，kg/kmol；

$R$ ——通用气体常数，取  $8.314\text{kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

任何气体的  $R$  值相同。 $R$  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。

在手册中常可查得气体的标准状况 ( $T_0=273\text{K}$ ； $p_0=101.3\text{kN/m}^2$ ) 下的密度  $\rho_0$ ，由式(1-2) 知

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{pT_0}{p_0T}$$

因而可算出任意温度  $T$ 、压强  $p$  下的密度  $\rho$

$$\rho = \rho_0 \frac{pT_0}{p_0T} \quad (1-3)$$

例 1-2 求氢气在  $1.0\text{atm}$ 、 $373\text{K}$  时的密度。

解：已知  $p=1.0\text{atm}=101.3\text{kN/m}^2$ ； $T=373\text{K}$ ； $M=2.016\text{kg/kmol}$ ； $R=8.314\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

代入式(1-2) 得

$$\rho = \frac{pM}{RT} = \frac{101.3 \times 2.016}{8.314 \times 373} = 0.065\text{kg/m}^3$$

混合气体的密度也可用式(1-3) 计算，此时应以混合气体的平均摩尔质量  $M_m$  代替式中的  $m$ ，平均摩尔质量  $M_m$  可按下式计算

$$M_m = M_1x_1 + M_2x_2 + \cdots + M_nx_n$$

式中， $M_n$ 、 $x_n$  分别表示混合气体中各组分气体的摩尔质量和体积分数。

相对密度：物质的密度与参考物质的密度在各自规定的条件下之比，符号为  $d$ ，无量纲量。

工程上将参考物质的密度规定为  $277\text{K}$  纯水的密度的，即  $1000\text{kg/m}^3$ ，所以流体的密度又可表示为：

$$\rho = 1000d_{277}^T \quad (1-4)$$

工业上常用测定流体相对密度的方法来确定流体的密度。其做法是将比重计放在待测密度的液体中测出其液体的相对密度，然后按式(1-4) 计算出液体的密度。此外，也可从有关手册中查取常用液体的密度或相对密度。表 1-6 列举了某些常用液体在  $20^\circ\text{C}$  时的密度。

表 1-6 某些液体溶液在 20℃ 时的密度

| 名 称                      | 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 名 称      | 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|-------------------------|----------|-------------------------|
| 水                        | 998                     | 31.5% 盐酸 | 1157                    |
| 25% NaCl 盐水              | 1186(25℃)               | 50% 氢氧化钠 | 1525                    |
| 25% CaCl <sub>2</sub> 盐水 | 1228                    | 苯        | 879                     |
| 汞                        | 13546                   | 酒精       | 793                     |
| 二硫化碳                     | 1263                    | 甘油 100%  | 1261                    |
| 98% 硫酸                   | 1836                    | 丙酮       | 792                     |
| 95% 硝酸                   | 1493                    | 汽油       | 760                     |
| 100% 醋酸                  | 1049                    | 煤油       | 780~820                 |

对于某些气体的相对密度, 则用它在标准状况下的密度与干空气密度之比来表示。表 1-7 为某些气体的密度和相对于干空气的相对密度。

表 1-7 某些气体的密度和相对密度 (标准状态下)

| 名 称  | 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 相对密度   | 名 称  | 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 相对密度  |
|------|-------------------------|--------|------|-------------------------|-------|
| 空气   | 1.293                   | 1      | 甲烷   | 0.71268                 | 0.554 |
| 氮气   | 1.2505                  | 0.96   | 乙炔   | 1.1747                  | 0.907 |
| 氢    | 0.77140                 | 0.596  | 乙烯   | 1.26035                 | 0.975 |
| 氧    | 1.429                   | 1.105  | 二氧化碳 | 1.976                   | 1.528 |
| 氩    | 0.0899                  | 0.0695 | 硫化氢  | 1.539                   | 1.19  |
| 一氧化碳 | 1.250                   | 0.9667 |      |                         |       |

## (2) 流体的压力 (压强)

垂直作用于流体单位面积上的力称为流体的静压力 (也称为静压强), 简称压力或压强, 用符号  $p$  表示, 其单位为 Pa。

$$p = \frac{F}{S} \quad (1-5)$$

用液柱高度表示压力时, 因  $F = mg = V\rho g = Sh\rho g$  代入上式中, 故:

$$p = \rho gh \quad (1-6)$$

$$\text{或} \quad h = \frac{p}{\rho g} \quad (1-7)$$

式中  $F$ ——力, N;

$S$ ——面积, m<sup>2</sup>;

$h$ ——液柱高度, m;

$g$ ——重力加速度, m/s<sup>2</sup>。

由式(1-7)可见,  $h$  为该液体在压力  $p$  作用下产生的高度。液体一定时,  $h$  与  $p$  成正比关系。

同一压力,  $h$  与  $\rho$  成反比关系, 且与液体的种类有关,  $\rho$  值不同  $h$  值也不同。因此, 用液柱高度来表示流体的压力时, 必须注明是何种液体, 该液体一般按常温确定  $\rho$  值, 若注明了温度则应按注明的温度确定  $\rho$  值。

在物理单位制中, 压力常使用物理大气压或标准大气压 (atm)、毫米水柱 (mmH<sub>2</sub>O)、米水柱 (mH<sub>2</sub>O)、毫米汞柱 (mmHg)。在工程单位制中, 压力常用工程大气压 (at)。这些不属于国际单位制, 目前在生产或生活中仍有应用。不同单位间的压力换算系数可见表 1-8。

表 1-8 不同单位制间的压力换算系数

| 单位名称     | 符 号                | 换算成法定计量单位的换算系数    |
|----------|--------------------|-------------------|
| 巴        | bar                | $10^5 \text{ Pa}$ |
| 千克力每平方厘米 | $\text{kgf/cm}^2$  | 98.0665 kPa       |
| 工程大气压    | at                 | 98.0665 kPa       |
| 标准大气压    | atm                | 101.325 kPa       |
| 毫米汞柱     | mmHg               | 133.322 Pa        |
| 毫米水柱     | mmH <sub>2</sub> O | 9.80665 Pa        |

### (3) 压力的表示法

在生产中，测压仪表所测的压力为表压，不是真实压力。而在公式计算中，一般都要用真实压力，真实压力又称绝对压力。以绝对零压力线为起点的压力称为绝对压力，简称绝压。以大气压为起点，比大气压高的部分压力称为表压；比大气压低的那部分压力称为真空度（又称负压压）。三者关系如图 1-1 中 A、B 两点状态所示。

可见：绝对压 = 表压 + 大气压

绝对压 = 大气压 - 真空度

必须指出：大气压随温度、湿度和海拔高度而变。故同一表压，在不同地区的绝压是不同的，同一地点的绝压也随季节变化。在实验中，要用到压力时，必须测出当时当地的大气压。

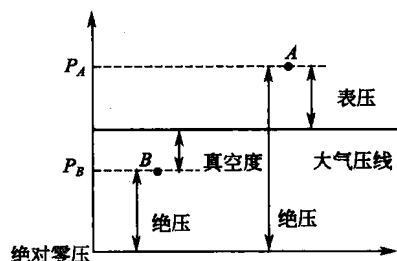


图 1-1 绝压、表压、真空度的关系

**例 1-3** 某台离心泵进、出口压力表读数分别为 220 mmHg（真空度）及 1.7 kgf/cm<sup>2</sup>（表压）。当地大气压强为 760 mmHg，试求它们的绝对压力（以法定单位制表示）。

解：泵进口绝对压力  $p_1 = 760 - 220 = 540 (\text{mmHg}) = 72 (\text{kPa})$

泵出口绝对压力  $p_2 = 1.7 \times 98.0665 + 760 \times 133.322 \times 10^{-3} = 268 (\text{kPa})$

**例 1-4** 在兰州操作的苯乙烯精馏塔塔顶的真空度为 620 mmHg，问在天津操作时，如要维持相同的绝对压力，真空表读数应为多少？兰州地区的大气压强为 640 mmHg，天津地区的大气压强为 760 mmHg。

解：根据兰州地区的条件，求得操作时塔顶的绝对压强。

绝对压强 = 大气压 - 真空度 =  $640 - 620 = 20 (\text{mmHg})$

在天津操作时，维持同样绝对压强，则

真空度 = 大气压强 - 绝对压强 =  $760 - 20 = 740 (\text{mmHg})$

### 1.3.2 流体静力学基本方程

在重力场中，流体在重力和压力的作用下达达到静力平衡，因而处于相对静止状态。重力是不变的，但静止流体内部各点的压力是不同的。即在不同高度的水平面上，流体的静压力不同。

在图 1-2 所示容器内的静止液体，其密度为  $\rho$ 。在静止液体中任意取一垂直液柱，上下底面积均为  $S$ ，以容器底面为基准水平面，并设液柱上、下底与基准面的垂直距离分别为  $Z_1$  和  $Z_2$ 。

设作用于上底的流体静压强为  $p_1$ ，则总作用力为  $F_1 = Sp_1$ ，其方向向下；作用于下底

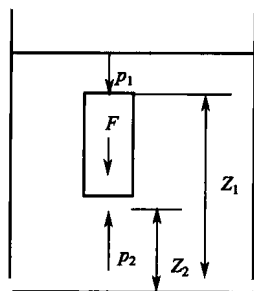


图 1-2 静止液体内部力的平衡

的流体静压强为  $p_2$ ，则总作用力为  $F_2 = Sp_2$ ，其方向向上；液柱的重力为  $F = mg = gS(Z_1 - Z_2)\rho g$ ，其方向向下。

液柱在处于平衡状态时，在垂直方向上各力的代数和应为零，即

$$p_1 + F_1 - p_2 = 0$$

将  $p_1$ 、 $p_2$  和  $F$  代入，得： $Sp_1 + S(Z_1 - Z_2)\rho g - Sp_2 = 0$

$$\text{整理得} \quad p_2 = p_1 + (Z_1 - Z_2)\rho g \quad (1-8)$$

若将液柱上底取在液面，并设液面上方的压强为  $p_0$ ，液柱高度  $h = Z_1 - Z_2$  则式(1-8)可改写为

$$p_2 = p_0 + h\rho g \quad (1-9)$$

式(1-8)和式(1-9)均称为静力学基本方程式，它们表明了静止流体内部压力变化的规律，可以看出：

① 在静止的液体中，液体任一点的压强与液体密度和其深度有关，液体密度越大，深度越大，则该点的压力越大；

② 当液体上方的压强  $p_0$  或液柱内部任一点的压强  $p_1$  有变化时，必将使液体内部其他各点的压强发生同样大小的变化；

③ 在连通的同一种静止液体内部，同一水平面的流体压强相等，或是压强相等的两点必在同一水平面上。

**例 1-5** 某塔高 30m。进行水压试验时，距底 10m 高处的压力表的读数为  $500\text{kN/m}^2$ ，求塔底处水的压强。当时塔外大气压强为  $100\text{kN/m}^2$ ，见图 1-3。

**解：**塔中部压力表处的水压力

$$p_1 = 500 + 100 = 600\text{kN/m}^2$$

$$\text{由 } p_2 = p_1 + (Z_1 - Z_2)\rho g$$

已知  $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ ；取塔底为基准水平面，则压强表处的高度  $Z_1 = 10\text{m}$ ，塔底高度为  $Z_2 = 0\text{m}$ ，塔顶高度  $Z_2' = 30\text{m}$  代入静力学基本方程，得塔底处水压强：

$$p_2 = 600 \times 10^3 + (10 - 0) \times 1000 \times 9.81 = 698.1 \times 10^3 \text{N/m}^2$$

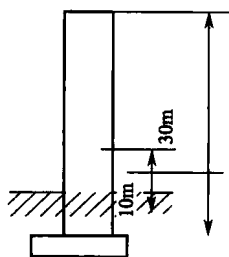


图 1-3 例 1-5 附图

**例 1-6** 见图 1-4，储油罐中盛有相对密度为 0.96 的重油，油面高于罐底 9.6m，油面上方为常压。在罐侧壁的下部有一直径为 0.6m 的圆孔，并装有孔盖，其孔中心距罐底为 0.8m，试求作用于孔盖上的总压力为多少？

**解：**欲求作用于孔盖上的总压力，则应先求出作用于孔盖上的平均压强  $p'_1$ 。通过孔盖

中心作水平面，设此平面上的流体静压强为  $p_1$ ，因在此平面上各质点与罐底距离相等，因此在此面上各质点的压强相等，

$$\text{即：} \quad p' = p_1$$

$$\text{故：} \quad p_1 = p_0 + (Z_0 - Z_1)\rho g$$

同时，孔盖外侧承受大气压强的作用，方向与  $p'_1$  相反，所以孔盖实际受的压强：

$$\Delta p = p' - p_0$$

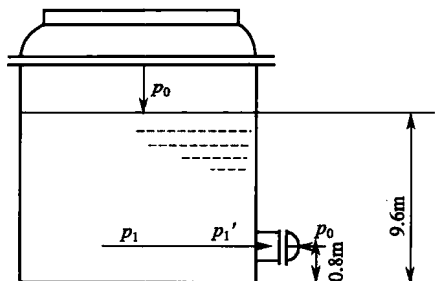


图 1-4 例 1-6 附图