



中国石油高技能人才培训丛书

天然气净化操作技师 培训教程

中国石油天然气集团公司人事部 © 编

石油工业出版社

中国石油高技能人才培养丛书

天然气净化操作技师 培训教程

中国石油天然气集团公司人事部 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书简要介绍了天然气净化基础理论,重点介绍了天然气净化装置的日常操作、异常情况处理和事故处理,以及仪表控制、工艺技术管理和 HSE 管理的内容。全书内容丰富,言简意赅,融汇了天然气净化厂丰富的实际操作经验。本书可作为天然气净化操作高技能人才的培训教材,也可供生产管理、科研、设计人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

天然气净化操作技师培训教程/中国石油天然气集团公司人事部编.
北京:石油工业出版社,2012.6

(中国石油高技能人才培养丛书)

ISBN 978 - 7 - 5021 - 8976 - 1

I. 天…

II. 中…

III. 天然气净化-技术培训-教材

IV. TE644

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 046267 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523582 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 6 月第 1 版 2012 年 6 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12.75

字数: 323 千字

定价: 30.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《中国石油高技能人才培训丛书》

编 委 会

主 任：单昆基

副 主 任：任一村

执行主任：丁传峰

委 员：（按姓氏笔画排序）

王子云	左洪波	吕凤军	刘 勇	刘德如
杨 峰	杨静芬	李世效	李建军	李孟洲
李钟馨	李保民	李超英	李禄松	何 波
张建国	陈宝全	尚全民	周宝银	徐进学
高 强	高丽丽	职丽枫	崔贵维	韩贵金
傅敬强	霍 良			

前 言

为加快高技能人才知识更新，提升高技能人才职业素养、专业知识和解决生产实际问题的能力，进一步发挥高端带动作用，在总结“十一五”技师、高级技师跨企业、跨区域开展脱产集中培训的基础上，中国石油天然气集团公司人事部依托承担集团公司技师培训项目的培训机构，组织专家力量，历时一年多时间，将教学讲义、专家讲座、现场经验及学员技术交流成果资料加以系统整理、归纳、提炼，开发出首批15个职业（工种）高技能人才培训系列教材，由石油工业出版社陆续出版。

本套教材在内容选择上，突出新知识、新技术、新材料、新工艺等“四新”技术介绍，重视工艺原理、操作规程、核心技术、关键技能、故障处理、典型案例、系统集成技术、相关专业联系等方面的知识和技能，以及综合技能与创新能力的知识介绍，力求体现“特、深、专、实”的特点，追求理论知识体系的通俗易懂和工作实践经验的总结提炼。

本套教材是集团公司加快适用于高技能人才现代培训技术和特色教材开发的有益尝试，适合于已取得技师、高级技师职业资格的人员自学提高、研修培训、传承技艺使用，也适合后备高技能人才超前储备知识使用，同时，也为现场技术人员和培训机构提供了一套实践参考用书。

《天然气净化操作技师培训教程》由西南油气田公司组织编写，傅敬强、岑岭任主编，参加编写的人员有王晓东、罗大明、宋文中、杨刚、曾云东、梁革、沈荣华、瞿杨、张小兵、陈世剑、倪钟利、何沿江等。参加审定的人员有西南油气田公司唐荣武、王鸿宇、张廷州、付适、曾刚、钱友美，长庆油田公司张建波，塔里木油田公司米新利。在编写过程中，天然气脱烃部分内容得到塔里木油田公司吴坚、周志强，长庆油田公司柴华等有关人员大力协助，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中错误、疏漏之处在所难免，请广大读者提出宝贵意见。

编者

2011年10月

目 录

绪 论	1
第一章 天然气净化基础理论	4
第一节 动量传递	4
第二节 热量传递	14
第三节 质量传递	22
第四节 化学反应工程	28
第二章 天然气预处理	40
第一节 工艺原理及流程	40
第二节 装置操作	40
第三章 天然气酸性气体脱除	43
第一节 工艺原理及流程	43
第二节 影响操作的主要因素	45
第三节 装置操作	49
第四章 天然气脱水	58
第一节 三甘醇脱水	58
第二节 分子筛脱水	66
第五章 天然气脱炔	72
第一节 工艺原理及流程	72
第二节 装置操作	74
第六章 硫黄回收	76
第一节 常规克劳斯硫黄回收	76
第二节 超级克劳斯硫黄回收	95
第三节 冷床吸附硫黄回收	98
第四节 中国石油硫黄回收	100
第五节 MCRC 硫黄回收	103
第六节 等温亚露点硫黄回收	105
第七章 尾气处理	109
第一节 工艺原理及流程	109
第二节 装置操作	110
第八章 酸水汽提	117
第一节 工艺原理及流程	117
第二节 装置操作	118
第九章 硫黄成型	120
第一节 工艺原理及流程	120

第二节	装置操作	121
第十章	污水处理	123
第一节	工艺原理及流程	123
第二节	装置操作	124
第十一章	火炬及放空系统	129
第一节	工艺原理及流程	129
第二节	装置操作	129
第十二章	新鲜水及循环水处理	132
第一节	工艺原理及流程	132
第二节	装置操作	133
第十三章	蒸汽及凝结水系统	138
第一节	工艺原理及流程	138
第二节	装置操作	139
第十四章	空氮系统	146
第一节	工艺原理及流程	146
第二节	装置操作	147
第十五章	仪表自控知识	151
第一节	仪表自控系统简介	151
第二节	常见故障处理	165
第三节	PID 参数整定	167
第十六章	工艺技术管理	170
第一节	技术文件的编制	170
第二节	质量控制和能源管理	175
第十七章	天然气净化厂 HSE 管理	179
第一节	HSE 管理体系简介	179
第二节	危险源辨识与风险控制	180
第三节	常用 HSE 工具方法简介	193
参考文献		196

绪 论

一、天然气净化概述

作为当今世界首选的环保燃料和清洁优质的化工原料，天然气使用方便并具有较高的经济效益，其生产和消费发展迅速，在国民经济与社会发展中的地位 and 作用日益突出。

中国是世界上发现和利用天然气历史最悠久的国家之一，以天然气作为燃料制盐已有上千年的历史。中华人民共和国成立后，天然气工业开始形成规模，并得到迅猛发展。

2008年、2009年、2010年，我国天然气产量分别为 $760 \times 10^8 \text{m}^3$ 、 $830 \times 10^8 \text{m}^3$ 、 $944 \times 10^8 \text{m}^3$ ，增幅迅速，天然气消费比重呈稳步上升势头。按照国家“十二五”能源规划，从促进节能减排、发展低碳经济和可持续发展出发，天然气被列为大力发展的产业，这为天然气行业加快发展带来十分有利的条件。预计我国远景天然气可采资源量为 $15 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，到2020年可实现年产量 $2200 \times 10^8 \text{m}^3$ 。我国天然气消费以年均10%的速度迅速增长，2010年增长速度高达18.2%，预计2020年天然气消费量将达到 $3000 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占能源消费结构的10%。目前，我国在抓好川渝、塔里木、长庆及海上气田开发，加速国内天然气工业发展的基础上，大力加强与国外合作，共同开发海外天然气资源。2009年12月，我国引进土库曼斯坦、哈萨克斯坦等中亚天然气作为西气东输二线的气源；同时，准备陆上引进俄罗斯的天然气和海上引进澳大利亚与印度尼西亚的液化天然气，以此满足我国经济快速发展的需要。

天然气工业一般由地下、地面两部分工程构成，涉及勘探、开发、采气、净化、管输等环节。天然气的净化处理是将采出的天然气变成商品气过程中的一个重要组成部分。天然气净化是指脱除天然气中的有害组分，使之达到标准规定的指标，通常含脱硫脱碳、脱水、硫黄回收及尾气处理等单元。目前，天然气净化已形成一个独立的、系统的专业，其地位越来越重要。

天然气净化的工艺技术较为成熟。其中脱除天然气中酸性组分的方法主要有化学溶剂吸收法、物理溶剂吸收法、物理—化学吸收法、直接氧化法、固体吸收/吸附法及膜分离法等。醇胺法工艺从20世纪30年代实现工业化以来，一直作为天然气净化的主要方法。在众多的净化工艺中，脱硫是核心，其次是脱水。脱水工艺主要有三甘醇脱水、分子筛脱水等。此外，为满足生产、使用要求及为达到管输标准，还需进行必要的脱碳、脱烃处理。硫黄回收工艺主要有常规克劳斯工艺、冷床吸附（CBA）工艺、超级克劳斯（Super Claus）工艺、低温克劳斯吸附（MCRC）工艺、中国石油硫黄（CPS）回收技术等。

在20世纪80年代以前，天然气净化工艺发展的主要推动力是改善其经济性以及实践提出的新课题。在此之后，环保要求成为技术发展的重要推动力。

为适应四川气田开发的要求，20世纪60年代起国内开始进行天然气净化工艺的研究开发工作，从70年代末期起，选择性地从国外引进一些先进的天然气净化工艺技术和装置。目前我国的天然气净化工艺已基本赶上国外的先进水平。

目前中国石油天然气净化生产主要集中在长庆、塔里木、川渝等地区。

长庆气田天然气主要为低含硫天然气，一般 H_2S 含量低于 $1\text{g}/\text{m}^3$ ，有的甚至不含硫，但 CO_2 含量较高，一般在5%（体积分数）左右。长庆气田第一、第二、第三天然气净化厂主

要是脱硫脱碳、脱水、硫黄回收，脱硫脱碳采用甲基二乙醇胺（MDEA）水溶液化学吸收工艺，脱水采用三甘醇（TEG）工艺，硫黄回收采用直接氧化（Clinsulf-DO）工艺，设计年处理能力为 $80 \times 10^8 \text{m}^3$ ；榆林、长北、米脂及苏里格天然气处理厂主要是脱烃、脱水，原料气不含硫化氢，设计年处理能力为 $145 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

塔里木盆地天然气资源十分丰富，天然气资源量达 $8.93 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占全国天然气总资源量的 22%。迄今已发现了牙哈、克拉 2、英买、迪那、大北、克深 2 等一系列大中型气田，是目前全国最大的产气区。塔里木克拉 2 净化厂主要是脱烃、脱水，原料气不含硫化氢，设计年处理能力为 $99 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

川渝油气田天然气主要为含硫天然气，必须净化后才能外输，所属天然气净化厂主要分布在重庆长寿、垫江、忠县、万州和四川渠县、大竹、江油、遂宁、隆昌、荣县、江津、仪陇以及达州等地，截至 2011 年 5 月底，有天然气净化厂 14 座，共 22 套净化装置，设计年处理能力达 $150 \times 10^8 \text{m}^3$ ，主要采用 MDEA 及其配方型溶液（CT8-5）、MDEA—环丁砜水溶液（Sulfinol-M）、二异丙醇胺（DIPA）—环丁砜水溶液（Sulfinol-D）等化学吸收法脱硫，TEG 脱水，克劳斯（Claus）及其延伸硫黄回收工艺，斯科特（SCOT）还原吸收法处理尾气。

二、天然气净化装置简介

一座完整的天然气净化装置通常包括原料气预处理、脱硫脱碳、脱水、硫黄回收、尾气处理、酸水汽提等主体单元和辅助装置及公用系统（硫黄成型、消防、污水处理、火炬及放空系统、新鲜水处理、蒸汽及冷凝水系统、工厂风及仪表风系统、氮气系统和燃料气系统）。如果原料天然气中富含轻烃，还应设轻烃回收装置。当然，为了使天然气净化装置正常运转，自动化控制、化验分析、供配电和维修等配套设施也是必需的。

（一）主体单元

1. 原料气预处理单元

采用重力分离和过滤分离等方法去除原料天然气中夹带的化学药剂、重烃、游离水、固体杂质等。

2. 脱硫脱碳单元

通过气—液吸收、气—固吸附和化学转化等途径除去天然气中的含硫化合物和部分 CO_2 ，使其达到商品天然气管输标准。天然气脱硫是天然气净化的“龙头”，其工艺类别较多，但主要是化学吸收法。

3. 脱水单元

采用不同工艺脱除天然气中水分，使其达到商品天然气管输标准中水露点要求。其工艺相对脱硫工艺来说，要简单得多，主要有甘醇法、分子筛法和其他方法如压缩、冷却、氯化钙吸收及膜分离等。

4. 硫黄回收单元

对脱硫、尾气处理和酸水汽提单元产生的酸气进行后续处理，目前工业上普遍采用的是各种形式的克劳斯工艺。

5. 尾气处理单元

20 世纪 70 年代后为保护环境而发展起来的净化工艺，目的是对克劳斯装置的尾气作进一步处理，使大气污染物二氧化硫达到规定的排放要求。尾气处理通常有还原类工艺和氧化类工艺，常用方法有 SCOT 及尾气灼烧处理。

6. 酸水汽提单元

对各单元来的酸水采用蒸汽加热汽提，将酸水中的 H_2S 、 CO_2 、 NH_3 等少量易挥发组分汽提出来，使之达到污水处理装置要求。

(二) 辅助装置和公用系统

1. 硫黄成型装置

对来自硫黄回收单元的液硫进行储存、冷却、成型、计量与包装。

2. 消防装置

根据生产特点，在建筑、工艺设计、电气防爆等方面采取防火防爆措施，并配备各种消防器材及设施，以备发生火灾时使用。

3. 污水处理装置

对全厂生产、检修过程中产生的污水进行收集处理，使之达到国家排放标准。在水资源贫乏地区，应满足中水回用的要求。

4. 火炬及放空装置

处理工厂开车、停车及紧急事故情况下排出的原料气、湿净化气、净化气、酸气等，通过火炬燃烧排放，有效减少对环境的污染。

5. 新鲜水和循环水处理系统

新鲜水处理是对原水进行处理，使水质、水量、水压满足生产需要。循环水处理是为整个净化装置提供合格的冷却用水。

6. 蒸汽及冷凝水系统

该系统负责供给全装置生产时所需的蒸汽，并回收蒸汽凝结水。蒸汽主要用于溶液的再生和全装置的保温。

7. 工厂风及仪表风系统

该系统为全装置提供净化空气和非净化空气。净化空气主要作为各气动调节阀驱动气，非净化空气主要作为装置的开、停工吹扫及其他用风。

8. 氮气系统

氮气系统为全装置提供合格的氮气。氮气在净化厂主要作为吹扫置换气和保护气。

9. 燃料气系统

燃料气系统为全装置提供燃料气。装置正常生产期间，燃料气主要由脱硫及脱水单元的闪蒸气和净化天然气供给；在装置停产期间，燃料气一般由外部供给。

(三) 其他装置

1. 自动化控制

通常采用 DCS（集散控制系统）、ESD（紧急停车系统）以及 F&GS（火灾及气体检测报警系统）进行监视、控制和管理。全厂设中央控制室，DCS 采用开放式网络结构，中央控制室对工艺装置区、辅助生产区等进行集中监视控制。ESD 实现对生产过程自动监视和事故状态下安全连锁保护，分设备级、装置级、全厂级三级连锁。F&GS 实现全厂火灾、可燃气体和有毒气体的泄漏检测、报警及安全保护。

2. 供配电

主要为全装置提供 6kV、380V、220V 等电源，一般由高压变配电设施、低压负荷中心、控制室、不间断电源（UPS）、主变室组成。

第一章 天然气净化基础理论

化工过程操作可分为两大类：一类为不进行化学反应的物理过程，如天然气净化厂的原料气预处理、脱水脱烃、硫黄成型等过程；另一类则以进行化学反应为主，如天然气净化厂的脱硫脱碳、硫黄回收、污水处理等过程。所有单元操作过程都属于速率过程，而动量、热量和质量的传递速率对化工过程的进行起重要作用。传递过程原理是化工单元操作的基础，它注重从理论上揭示各种单元操作过程和设备基本原理，而各种具体的单元操作则是这三种基本过程的不同方式的组合，图 1-1 表达了这种关系。在天然气净化厂的单元操作主要有过滤与沉降、气液吸收、加热冷却、气固吸附、精馏等。

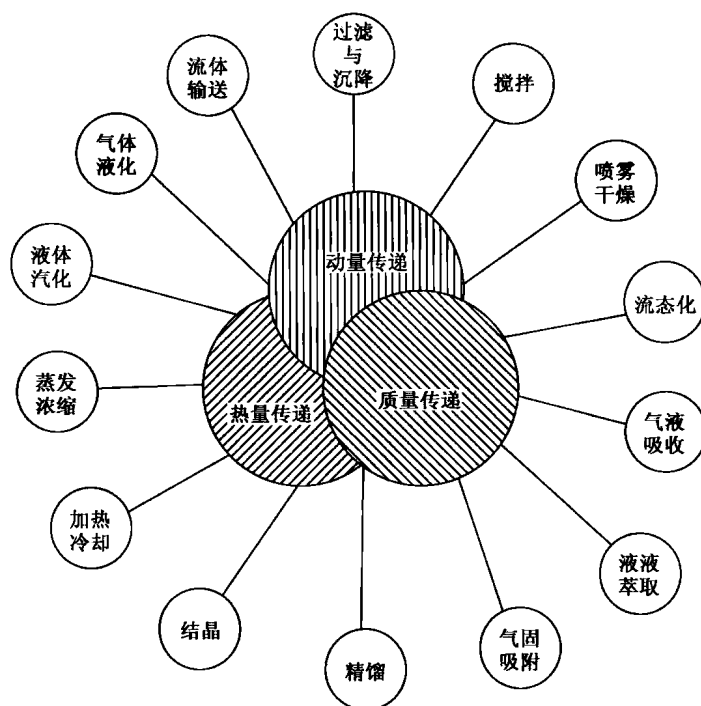


图 1-1 传递现象与单元操作的关系

第一节 动量传递

一、牛顿粘性定律

流体的典型特征是具有流动性，但不同流体的流动性能不同，这主要是因为流体内部质点间作相对运动时存在不同的内摩擦力，这种表明流体流动时产生内摩擦力的特性称为粘性。粘性是流动性的反面，流体粘性越大，其流动性越小。流体粘性是流体产生流动阻力的根源。

如图 1-2 所示，设有上、下两块面积很大且相距很近的平行平板，板间充满某种静止

液体。若将下板固定，而对上板施加一个恒定的外力，上板就以恒定速度 u 沿 x 方向运动。若 u 较小，则两板间的液体就会分成无数平行的薄层而运动，粘附在上板底面下的一薄层流体以速度 u 随上板运动，其下各层液体的速度依次降低，紧贴在下板表面的一层液体，因粘附在静止的下板上，其速度为零，两平板间流速呈线性变化。对任意相邻两层流体来说，上层速度较大，下层速度较小，前者对后者起带动作用，而后者对前者起拖曳作用，流体层之间的这种相互作用，产生内摩擦，而流体的粘性正是这种内摩擦的表现。

平行平板间的流体，流速分布为直线，而流体在圆管内流动时，速度分布呈抛物线形，如图 1-3 所示。

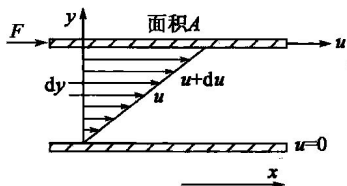


图 1-2 平板间液体速度变化

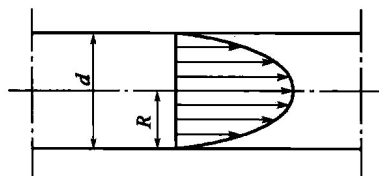


图 1-3 实际流体在管内的速度分布

实验证明，对于一定的流体，内摩擦力 F 与两流体层的速度差 $d\dot{u}$ 成正比，与两层之间的垂直距离 dy 成反比，与两层间的接触面积 A 成正比，即：

$$F = \mu A \frac{d\dot{u}}{dy} \quad (1-1)$$

式中 F ——内摩擦力，N；

$\frac{d\dot{u}}{dy}$ ——法向速度梯度，即在与流体流动方向相垂直的 y 方向流体速度的变化率， $1/s$ ；

μ ——比例系数，称为流体的粘度或动力粘度， $Pa \cdot s$ 。

一般，单位面积上的内摩擦力称为剪应力，以 τ 表示，单位为 Pa ，则式 (1-1) 变为：

$$\tau = \mu \frac{d\dot{u}}{dy} \quad (1-2)$$

式 (1-1)、式 (1-2) 称为牛顿粘性定律，表明流体层间的内摩擦力或剪应力与法向速度梯度成正比。

剪应力与速度梯度的关系符合牛顿粘性定律的流体，称为牛顿型流体，包括所有气体和大多数液体；不符合牛顿粘性定律的流体称为非牛顿型流体，如高分子溶液、胶体溶液及悬浮液等。

二、伯努利方程

伯努利方程反映了流体在稳态流动过程中，各种形式机械能的相互转换关系。

(一) 总能量衡算

如图 1-4 所示的定态流动系统中，流体从 1-1' 截面流入，2-2' 截面流出。

衡算范围：1-1'、2-2' 截面以及管内壁所围

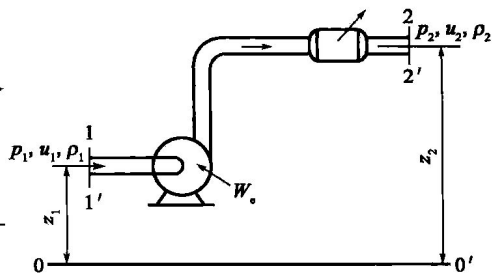


图 1-4 定态流动系统

成的空间。

衡算基准：1kg 流体。

基准水平面：0-0'水平面。

流体的机械能有以下几种形式。

1. 内能

储存于物质内部的能量。设 1kg 流体具有的内能为 U ，其单位为 J/kg。

2. 位能

流体受重力作用在不同高度所具有的能量称为位能。将质量为 m 的流体自基准水平面 0-0' 升举到 z 处所做的功，即为位能：

$$\text{位能} = mgz$$

1kg 的流体所具有的位能为 zg ，其单位为 J/kg。

3. 动能

流体以一定速度流动，便具有动能：

$$\text{动能} = \frac{1}{2}mu^2$$

1kg 的流体所具有的动能为 $\frac{1}{2}u^2$ ，其单位为 J/kg。

4. 静压能

在静止流体内部，任一处都有静压力，同样，在流动着的流体内部，任一处也有静压力。如果在一内部有液体流动的管壁面上开一小孔，并在小孔处装一根垂直的细玻璃管，液体便会在玻璃管内上升，上升的液柱高度即是管内该截面处液体静压力的表现，如图 1-5 所示。对于图 1-4 的流动系统，由于在 1-1' 截面处流体具有一定的静压力，流体要通过该截面进入系统，就需要对流体作一定的功，以克服这个静压力。换句话说，进入截面后的流体，也就具有与此功相当的能量，这种能量称为静压能或流动功。

质量为 m 、体积为 V_1 的流体，通过 1-1' 截面所需的作用力 $F_1 = p_1 A_1$ ，流体推入管内所走的距离 V_1/A_1 ，与此功相当的静压能：

$$\text{静压能} = p_1 A_1 \frac{V_1}{A_1} = p_1 V_1$$

1kg 的流体所具有的静压能为 $\frac{p_1 V_1}{m} = \frac{p_1}{\rho_1}$ ，其单位

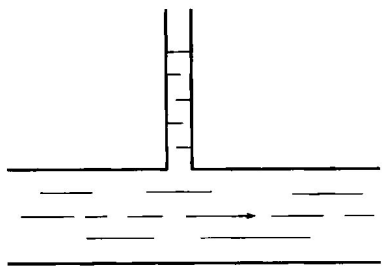


图 1-5 流动液体存在静压力的示意图 为 J/kg。

以上三种能量（位能、动能、静压能）均为流体在截面处所具有的机械能，三者之和称为某截面上的总机械能。

此外，流体在流动过程中，还有通过其他外界条件与衡算系统交换的能量。

5. 热

若管路中有加热器、冷却器等，流体通过时必与之换热。设换热器向 1kg 流体提供的热量为 q_e ，其单位为 J/kg。

6. 外功

在图 1-4 的流动系统中，还有流体输送机械（泵或风机）向流体作功，1kg 流体从流

体输送机械所获得的能量称为外功或有效功,用 W_e 表示,其单位为 J/kg。

根据能量守恒原则,对于划定的流动范围,其输入的总能量必等于输出的总能量。在图 1-4 中,在 1-1' 截面与 2-2' 截面之间的衡算范围内,有:

$$U_1 + z_1 g + \frac{1}{2} u_1^2 + p_1 V_1 + W_e + q_e = U_2 + z_2 g + \frac{1}{2} u_2^2 + p_2 V_2 \quad (1-3)$$

$$\text{或} \quad W_e + q_e = \Delta U + \Delta z g + \frac{1}{2} \Delta u^2 + \Delta p V \quad (1-4)$$

在以上能量形式中,可分为两类:

- (1) 机械能: 位能、动能、静压能及外功,可用于输送流体;
- (2) 内能与热: 不能直接转变为输送流体的机械能。

(二) 实际流体的机械能衡算

1. 以单位质量流体为基准

假设流体不可压缩,则 $V_1 = V_2 = \frac{1}{\rho}$; 流动系统无热交换,则 $q_e = 0$; 流体温度不变,则 $U_1 = U_2$ 。

因实际流体具有粘性,在流动过程中必消耗一定的能量。根据能量守恒原则,能量不可能消失,只能从一种形式转变为另一种形式,这些消耗的机械能转变成热能,此热能不能再转变为用于流体输送的机械能,只能使流体的温度升高。从流体输送角度来看,这些能量是“损失”掉了。将 1kg 流体损失的能量用 $\sum W_f$ 表示,其单位为 J/kg。式 (1-3) 可简化为:

$$z_1 g + \frac{1}{2} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho} + W_e = z_2 g + \frac{1}{2} u_2^2 + \frac{p_2}{\rho} + \sum W_f \quad (1-5)$$

式 (1-5) 即为不可压缩实际流体的机械能衡算式,其中每项的单位均为 J/kg。

2. 以单位重量流体为基准

将式 (1-5) 各项同除重力加速度 g , 则有:

$$z_1 + \frac{1}{2g} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{W_e}{g} = z_2 + \frac{1}{2g} u_2^2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\sum W_f}{g}$$

令 $H_e = \frac{W_e}{g}$, $\sum h_f = \frac{\sum W_f}{g}$, 则:

$$z_1 + \frac{1}{2g} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho g} + H_e = z_2 + \frac{1}{2g} u_2^2 + \frac{p_2}{\rho g} + \sum h_f \quad (1-6)$$

式 (1-6) 中各项的单位均为 $\frac{\text{J/kg}}{\text{N/kg}} = \frac{\text{J}}{\text{N}} = \text{m}$, 表示单位重量流体所具有的能量。虽然各项的单位为 m, 与长度的单位相同, 但在这里应理解为 m 液柱, 其物理意义是指单位重量的流体所具有的机械能。习惯上将 z 、 $\frac{u^2}{2g}$ 、 $\frac{p}{\rho g}$ 分别称为位压头、动压头和静压头, 三者之和称为总压头, $\sum h_f$ 称为压头损失, H_e 为单位重量的流体从流体输送机械所获得的能量, 称为外加压头或有效压头。

(三) 流体机械能衡算

1. 理想流体的机械能衡算

理想流体是指没有粘性（即流动中没有摩擦阻力）的不可压缩流体。这种流体实际上并不存在，是一种假想的流体，但这种假想对解决工程实际问题具有重要意义。对于理想流体又无外功加入时，式（1-5）、式（1-6）可分别简化为：

$$z_1 g + \frac{1}{2} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho} = z_2 g + \frac{1}{2} u_2^2 + \frac{p_2}{\rho} \quad (1-7)$$

$$z_1 + \frac{1}{2g} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{1}{2g} u_2^2 + \frac{p_2}{\rho g} \quad (1-8)$$

通常式（1-7）、式（1-8）称为伯努利方程式，式（1-5）、式（1-6）是伯努利方程的引申，习惯上也称为伯努利方程式。

2. 非理想流体的机械能衡算

如图1-6所示，流体在水平等径直管中作定态流动。在1-1'和2-2'截面间列伯努利方程：

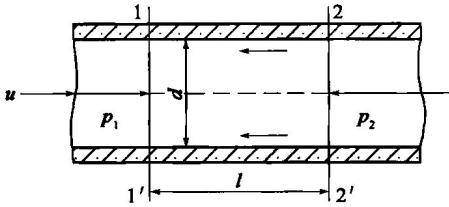


图1-6 直管阻力

$$z_1 g + \frac{1}{2} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho} = z_2 g + \frac{1}{2} u_2^2 + \frac{p_2}{\rho} + W_f$$

因是直径相同的水平管， $u_1 = u_2, z_1 = z_2$ ，则：

$$W_f = \frac{p_1 - p_2}{\rho} \quad (1-9)$$

若管道为倾斜管，则：

$$W_f = \left(\frac{p_1}{\rho} + z_1 g \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + z_2 g \right) \quad (1-10)$$

由此可见，无论是水平安装，还是倾斜安装，流体的流动阻力均表现为静压能的减少。仅当水平安装时，流动阻力恰好等于两截面的静压能之差。

对1-1'和2-2'截面间流体进行受力分析得到：由压力差而产生的推动力为 $(p_1 - p_2) \frac{\pi d^2}{4}$ ，与流体流动方向相同；流体的摩擦力为 $F = \tau A = \tau \pi d l$ ，与流体流动方向相反。

流体在管内作定态流动，在流动方向上所受合力必定为零，因此有：

$$(p_1 - p_2) \frac{\pi d^2}{4} = \tau \pi d l$$

整理得：

$$p_1 - p_2 = \frac{4l}{d} \tau \quad (1-11)$$

将式（1-11）代入式（1-9）中，得：

$$W_f = \frac{4l}{d} \tau \quad (1-12)$$

将式（1-12）变形，把能量损失 W_f 表示为动能 $\frac{u^2}{2}$ 的某一倍数：

$$W_f = \frac{8\tau}{\rho u^2} \frac{l}{d} \frac{u^2}{2}$$

令 $\lambda = \frac{8\tau}{\rho u^2}$ ，则：

$$W_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad (1-13)$$

式(1-13)为流体在直管内流动阻力的通式，称为范宁(Fanning)公式。式中 λ 为无量纲系数，称为摩擦系数或摩擦因数，与流体流动的雷诺数(Re)及管壁状况有关。

根据伯努利方程的其他形式，也可写出相应的范宁公式表示式：

$$\text{压头损失:} \quad h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2g} \quad (1-14)$$

$$\text{压力损失:} \quad \Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (1-15)$$

值得注意的是，压力损失 Δp_f 是流体流动能量损失的一种表示形式，与两截面间的压力差 $\Delta p = (p_1 - p_2)$ 意义不同，只有当管路为水平时，二者才相等。

范宁公式对层流与湍流均适用，只是两种情况下摩擦系数 λ 不同。

(四) 伯努利方程的讨论

(1) 如果系统中的流体处于静止状态，则 $u=0$ ，没有流动，自然没有能量损失， $\sum W_f = 0$ ，当然也不需要外加功， $W_e = 0$ ，则伯努利方程变为：

$$z_1 g + \frac{p_1}{\rho} = z_2 g + \frac{p_2}{\rho} \quad (1-16)$$

式(1-16)即为流体静力学基本方程式。由此可见，伯努利方程除表示流体的运动规律外，还表示流体静止状态的规律，而流体的静止状态只不过是流体运动状态的一种特殊形式。

(2) 伯努利方程式(1-7)、式(1-8)表明理想流体在流动过程中任意截面上总机械能、总压头为常数，即：

$$zg + \frac{1}{2}u^2 + \frac{p}{\rho} = \text{常数} \quad (1-17)$$

$$z + \frac{1}{2g}u^2 + \frac{p}{\rho g} = \text{常数} \quad (1-18)$$

但各截面上每种形式的能量并不一定相等，它们之间可以相互转换。图1-7清楚地表明了理想流体在流动过程中三种能量形式的转换关系。从1-1'截面到2-2'截面，由于管道截面积减小，根据连续性方程，速度增加，即动压头增大，同时位压头增加，但因总压头为常数，因此2-2'截面处静压头减小，也即1-1'截面的静压头转变为2-2'截面的动压头和位压头。

(3) 在式(1-5)中， zg 、 $\frac{1}{2}u^2$ 、 $\frac{p}{\rho}$ 分别表示单位质量流体在某截面上所具有的位能、动能和静压能，也就是说，它们是状态参数；而 W_e 、 $\sum W_f$ 是指单位质量流体在两截面间获

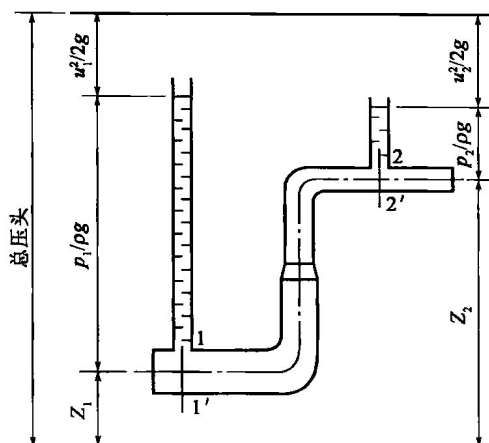


图 1-7 伯努利方程的物理意义

得或消耗的能量，可以理解为过程的函数。 W_e 是输送设备对 1kg 流体所做的功，单位时间输送设备所作的有效功称为有效功率：

$$N_e = m_s W_e \quad (1-19)$$

式中 N_e ——有效功率，W；

m_s ——流体的质量流量，kg/s。

实际上，输送机械本身也有能量转换效率，则流体输送机械实际消耗的功率应为：

$$N = \frac{N_e}{\eta} \quad (1-20)$$

式中 N ——流体输送机械的轴功率，W；

η ——流体输送机械的效率。

(4) 式 (1-7)、式 (1-8) 适用于不可压缩性流体。对于可压缩性流体，当所取系统中两截面间的绝对压力变化率小于 20%，即 $\frac{p_1 - p_2}{p_1} < 20\%$ 时，仍可用该方程计算，但式中的密度 ρ 应以两截面的平均密度 ρ_m 代替。

三、伯努利方程的应用

(一) 管路计算常用图表

(1) 常用流体在管内流动的流速范围见表 1-1。

表 1-1 某些液体的常用流速范围

流体种类及状况	常用流速范围, m/s	流体种类及状况	常用流速范围, m/s
水及一般液体	1.0 ~ 3.0	饱和水蒸气	
粘度较大的液体	0.5 ~ 1.0	> 800kPa	20 ~ 40
低压气体	8 ~ 15	< 800kPa	40 ~ 60
易燃、易爆低压气体	< 8	过热水蒸气	30 ~ 50
压力较高的气体	15 ~ 25	真空操作下气体	< 10