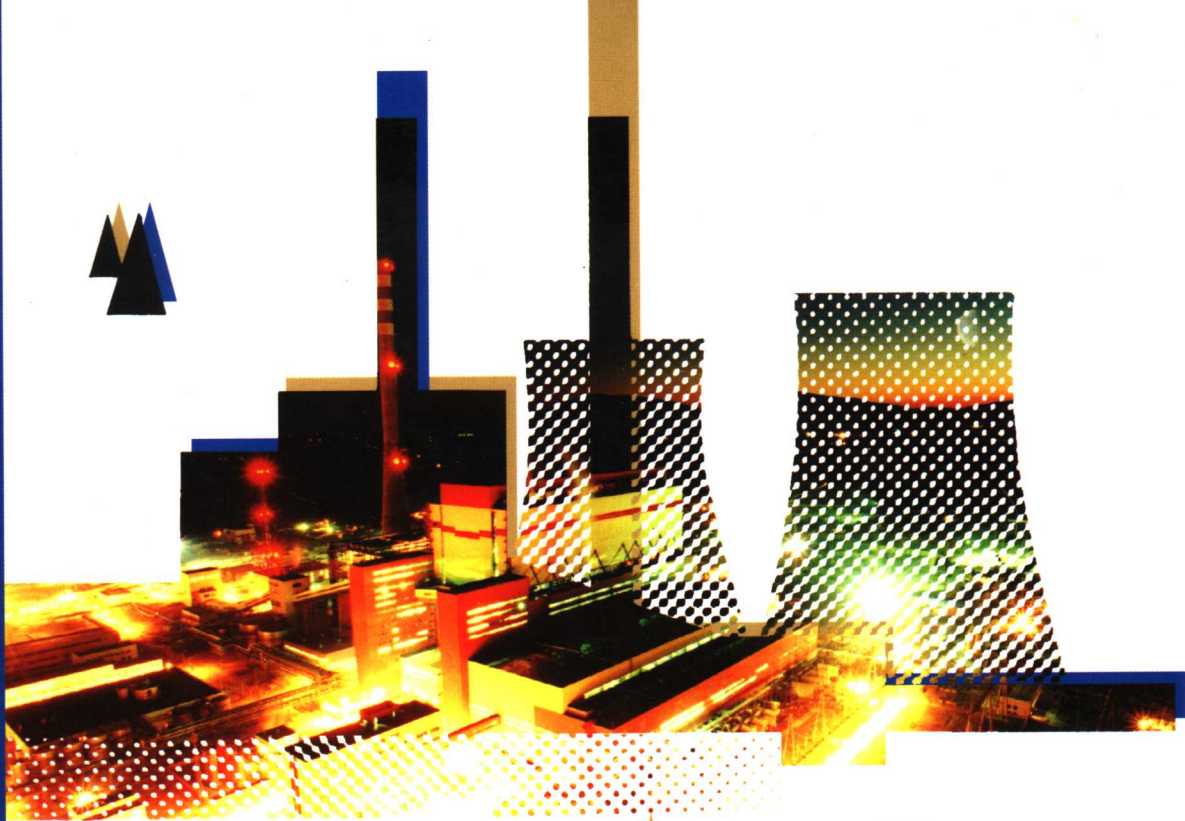


地方电厂岗位运行培训教材



第二版

辽宁省电力工业局 组编 于临桔 主编

锅炉运行



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

地方电厂岗位运行培训教材

第二版

锅炉运行

辽宁省电力工业局 组编 于临秸 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

近 10 多年来, 全国有一大批地方电厂、企业自备电厂和热电厂的 6~100MW 火力发电机组相继投产, 运行岗位新职工和生产人员迅速增加。为了搞好运行生产人员岗位技术培训和技能鉴定, 按照部颁《国家职业技能鉴定规范·电力行业》、《电力工人技术等级标准》和《火力发电厂运行岗位规范》以及运行规程的要求, 突出岗位重点、注重操作技能、便于考核培训等, 组织专家对 1995 年出版的第一版内容进行了全面修订和出版了《地方电厂岗位运行培训教材》(第二版), 分为锅炉运行、汽轮机运行、电气运行、热工控制与运行和电厂化学 5 册。

本书是《地方电厂岗位运行培训教材(第二版)》(锅炉运行), 共分六篇 32 章内容, 主要有: 第一篇通用基础知识, 介绍锅炉专业基础知识、中小型电站锅炉简介、燃料、制粉设备、燃烧原理及热平衡、蒸发设备及蒸汽净化、过热器与汽温调节设备、省煤器与空气预热器、锅炉附件、锅炉辅助设备、新设备投产、锅炉运行管理、电站锅炉安全管理与检验; 第二篇煤粉炉燃烧设备及运行, 介绍煤粉炉燃烧设备、煤粉炉整体布置、煤粉炉运行、煤粉炉事故处理; 第三篇旋风炉燃烧设备及运行, 介绍立式旋风炉概况、75t/h 液态排渣立式旋风炉整体布置、立式旋风炉对燃料的要求、立式旋风炉炉衬养护和烘干与热处理、立式旋风炉运行及常见故障; 第四篇层燃炉燃烧设备及运行, 介绍层燃炉燃烧设备、层燃炉运行及常见故障; 第五篇余热锅炉设备及运行, 介绍余热锅炉设备、水泥生产企业余热锅炉、炼油厂催化裂化余热锅炉; 第六篇循环流化床锅炉设备及运行, 介绍循环流化床锅炉基本概况、循环流化床锅炉基本原理、循环流化床锅炉主要设备及作用、典型循环流化床锅炉介绍、循环流化床锅炉运行等。

本书适用于全国地方电厂、企业自备电厂和热电厂 6~100MW 火力发电机组、具有高中及以上文化程度的锅炉设备运行的生产人员、工人、技术人员、管理干部以及有关锅炉专业师生等的岗位技能和技能鉴定的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

锅炉运行/于临秸主编; 辽宁省电力工业局组编. 2
版. —北京: 中国电力出版社, 2006
地方电厂岗位运行培训教材
ISBN 7-5083-3723-9

I. 锅... II. ①于... ②辽... III. 锅炉运行 - 技
术培训 - 教材 IV. TK227

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 136232 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)
航远印刷有限公司印刷
各地新华书店经售

*

1995 年 3 月第一版
2006 年 4 月第二版 2006 年 4 月北京第十九次印刷
787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 27.25 印张 736 千字
印数 67701—72700 册 定价 42.00 元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

电力工业部水电开发与农村电气化司
关于推荐《地方电厂岗位运行培训教材》
一 书 的 通 知

(办农电 [1993] 155 号)

各省、市、自治区电力局（农电局）：

近些年来，一大批小型供热发电机组相继投产，运行岗位新人员迅速增加。尽快提高运行人员技术素质，是确保地方电厂和电网安全经济运行的当务之急。

为了搞好运行人员技术培训，按部颁《国家职业技能鉴定规范·电力行业》、《电力工人技术等级标准》（火力发电部分）和《火力发电厂运行岗位规范》的要求，我司委托辽宁省电力工业局，组织有较深造诣和现场经验丰富的技术人员，经过三年多的时间，编写出一套《地方电厂岗位运行培训教材》，分锅炉、汽轮机、电气、热工、化学等五个专业分册。本教材在收集近年来许多电厂运行资料的基础上，结合地方电厂运行人员的实际水平，在理论上由浅入深，在实际上注重可操作性，是小型火力发电厂运行人员岗位培训和技能鉴定的理想教材。本教材将配有初、中、高三个技术等级的考核题库，可作为认定和晋升技术等级的考核依据。

1993年6月2日

《地方电厂岗位运行培训教材》

编 委 会

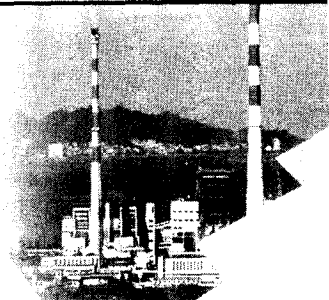
主任委员 孟铁铤

副主任委员 尹 炼 张菊珍 杨洪魁 陈建明

委 员 李甫林 曲之怀 刘洪汉 丁道明

任西萍 张进儒 庞经颢 王 芹

张金凯 王泽标 邵和春 范圣波



前言

近 10 多年来,有一大批地方电厂、企业自备电厂和小型供热发电厂的发电机组相继投产,运行岗位新职工和生产人员迅速增加。尽快提高运行人员的技术水平,是确保地方电厂和电网安全经济运行的当务之急。

为了搞好运行人员技术培训和技能鉴定,参照部颁《国家职业技能鉴定规范·电力行业》、《电力工人技术等级标准》(火力发电部分)和《火力发电厂运行岗位规范》的要求,1993 年受电力工业部水电开发和农村电气化司委托,辽宁省电力工业局组织大连电力学校和一些地方电厂具有丰富现场运行经验和教学经验的工程技术人员和教师,经过三年多的时间,于 1995 年 4 月编写并由中国电力出版社出版了本套《地方电厂岗位运行培训教材(第一版)》,本次是对第一版进行全面修订,并将本套教材分为锅炉运行、汽轮机运行、电气运行、热工控制与运行和电厂化学五个分册。

本套教材根据地方电厂发电设备运行的实际情况和运行人员的特点,从实用性出发,在系统、全面的基础上,依据规范标准,理论突出重点,实践注重技能操作,便于自学、培训和考核,对地方电厂运行工人和生产人员掌握应知专业理论知识和应会操作技能将起很大作用。

本套教材作为从事 6~100MW 火力发电机组运行工作、具有高中文化程度的运行人员培训教材,也可作为电力中等职业学校和技工学校的教材。

为配合本套教材的教学、考核命题以及运行生产人员平时带着问题自学的需要,我们还将对 1996 年底与《地方电厂岗位运行培训教材(第一版)》相配套编写出版的一套《地方电厂运行人员技术等级考核题库(第一版)》进行全面修订,也分为锅炉运行、汽轮机运行、电气运行、热工控制与运行和电厂化学五个分册,并与本套教材的第二版相配套,以满足培训和考核需要。

《地方电厂岗位运行培训教材(第二版)》(锅炉运行)是根据部颁《国家职业技能鉴定规范·电力行业》、《电力工人技术等级标准》(火力发电部分)和《火力发电厂运行岗位规范》的要求,结合地方电厂现状进行编写的,是作为地方电厂、企业自备电厂和热电厂 6~100MW 火力发电机组锅炉运行岗位技能和技能鉴定的培训教材。

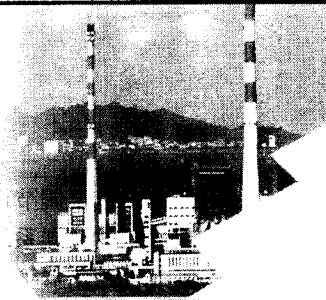
《地方电厂岗位运行培训教材(第二版)》(锅炉运行)由大连电力学校于临秸主编,并改编了第一、五、七~十二、十四~二十六、二十八~三十二章;刘早霞改编了第二~四、六章;大连市质量技术监督局锅炉压力容器检验所薛斌、于惠君、大连市质量技术监督局王铮编写了第十三章;大连西太平洋石油化工有限公司朱力辉、刘毅编写了第二十七章。本书第一版还有李文艺编写第一、七章,徐百业编写第五、八、九、十章,锦州热电公司韩维涛编写第十一、十二、十八~二十二章,大连热电公司张志万、门文安编写第十四~十七章,姚大成编写第二十三、二十四章,大连水泥厂杨喜芳编写第二十五、二十六章,大连热电公司

崔洪双、邵国军编写第二十八~三十二章。本书由辽宁省电力工业局高级工程师张菊珍、庞经颢负责审稿，最后由庞经颢审定。

由于编者水平和经历有限，书中难免存在不妥之处，希望读者批评指正。

编 者

2005年12月



目录

前言

第一篇 通用基础知识

第一章 锅炉专业基础知识	1
第一节 流体力学基本知识	1
第二节 热力学基本知识	19
第三节 传热学基本概念	25
第四节 热工测量仪表及自动调节	28
第二章 中小型电站锅炉简介	39
第一节 锅炉组成及工作过程	39
第二节 典型燃烧方式	40
第三节 锅炉分类和型号	42
第三章 燃料	43
第一节 概述	43
第二节 煤成分及其性质	43
第三节 煤主要特性	47
第四节 煤分类	50
第四章 制粉设备	51
第一节 煤粉性质	51
第二节 磨煤设备	54
第三节 制粉系统	60
第四节 制粉系统辅助设备	63
第五章 燃烧原理及热平衡	71
第一节 燃料燃烧	71
第二节 燃烧过程	74
第三节 锅炉热平衡及热经济性分析	77
第六章 蒸发设备及蒸汽净化	85
第一节 蒸发设备	85
第二节 自然水循环原理	88
第三节 水循环故障	92
第四节 蒸汽净化	95
第七章 过热器与汽温调节设备	105
第一节 概述	105
第二节 过热器结构与特性	105
第三节 热偏差	109

第四节	汽温调节设备	111
第五节	过热器系统举例	113
第六节	过热器管损坏及处理	114
第八章	省煤器与空气预热器	115
第一节	省煤器	115
第二节	空气预热器	116
第三节	省煤器与空气预热器故障及其预防	119
第九章	锅炉附件	122
第一节	安全门	122
第二节	水位计	124
第三节	吹灰器	127
第十章	锅炉辅助设备	130
第一节	给水系统及其阀门	130
第二节	锅炉通风设备	132
第三节	除尘设备	133
第四节	除灰设备	136
第十一章	新设备投产	141
第一节	概述	141
第二节	漏风试验	141
第三节	转动机械试运行	143
第四节	锅炉保护及连锁试验	145
第五节	烘炉	146
第六节	煮炉	148
第七节	锅炉化学清洗	151
第八节	锅炉并汽前试验、调整及冲洗蒸汽管路工作	154
第十二章	锅炉运行管理	159
第一节	安全生产制度	159
第二节	岗位责任制	159
第三节	交接班制度	161
第四节	巡回检查制度	163
第五节	设备定期试验、维护和轮换制度	163
第六节	办理热力机械工作票和设备验收制度	164
第七节	操作联系制度	165
第八节	运行分析制度	165
第九节	经济工作制度	166
第十节	现场培训制度	166
第十一节	文明生产制度	167
第十三章	电站锅炉安全管理与检验	168
第一节	电站锅炉安全管理	168
第二节	电站锅炉检验依据、检验形式及检验周期	171
第三节	电站锅炉内部检验	171

第四节	电站锅炉外部检验	177
第五节	电站锅炉水压试验	180

第二篇 煤粉炉燃烧设备及运行

第十四章	煤粉炉燃烧设备	184
第一节	概述	184
第二节	炉膛	185
第三节	燃烧器	187
第四节	点火装置	191
第十五章	煤粉炉整体布置	193
第一节	煤粉炉主要参数和整体布置	193
第二节	煤粉炉结构特点	193
第十六章	煤粉炉运行	199
第一节	概述	199
第二节	煤粉炉起动	199
第三节	煤粉炉停运	214
第四节	停炉后保养	216
第五节	煤粉炉运行调节	218
第十七章	煤粉炉事故处理	232
第一节	水位事故	232
第二节	燃烧事故	233
第三节	受热面损坏事故	235
第四节	厂用电中断事故	236

第三篇 旋风炉燃烧设备及运行

第十八章	立式旋风炉概况	240
第一节	立式旋风炉一般概念和特点	240
第二节	立式旋风炉燃烧过程	241
第十九章	75t/h 液态排渣立式旋风炉整体布置	243
第一节	概述	243
第二节	旋风筒	244
第三节	二次室	246
第四节	水循环回路组成	247
第五节	汽包	248
第六节	过热器	249
第七节	减温器	249
第八节	省煤器和空气预热器	250
第二十章	立式旋风炉对燃料的要求	251
第一节	煤灰成分对灰的熔融特性影响	251
第二节	添加剂掺量在现场的实际应用	253
第三节	立式旋风炉对煤粉细度的要求	254

第四节 立式旋风炉对燃料的适应性	255
第二十一章 立式旋风炉炉衬养护、烘干与热处理	257
第一节 炉衬低温养护	257
第二节 炉衬烘干与热处理	257
第二十二章 立式旋风炉运行及常见故障	259
第一节 旋风炉起动与停炉特殊要求	259
第二节 旋风炉故障及其处理	259

第四篇 层燃炉燃烧设备及运行

第二十三章 层燃炉燃烧设备	271
第一节 层燃炉工作特性及其在中小型电厂的应用	271
第二节 层燃炉燃烧设备	274
第三节 层燃炉整体布置	286
第四节 层燃炉燃烧过程	291
第二十四章 层燃炉运行及常见故障	297
第一节 层燃炉运行	297
第二节 链条炉燃烧调节	297
第三节 链条炉常见故障	300

第五篇 余热锅炉设备及运行

第二十五章 余热锅炉设备	301
第一节 概述	301
第二节 余热锅炉分类	302
第二十六章 水泥生产企业余热锅炉	306
第一节 HG-F2900-1型余热锅炉结构	306
第二节 余热锅炉设备组成及作用	309
第三节 余热锅炉辅助设备	317
第四节 余热锅炉工作过程	319
第五节 余热锅炉起动与停炉	320
第六节 余热锅炉运行监视与调整	323
第七节 余热锅炉事故处理及预防	326
第二十七章 炼油厂催化裂化余热锅炉	328
第一节 概述	328
第二节 催化裂化两种常用余热锅炉	328
第三节 催化裂化余热锅炉产汽系统和附属设备	337
第四节 催化裂化余热锅炉运行	340
第五节 催化裂化余热锅炉常见故障及处理	343

第六篇 循环流化床锅炉设备及运行

第二十八章 循环流化床锅炉基本概况	346
第一节 循环流化床锅炉发展状况	346

第二节	循环流化床锅炉主要优缺点	347
第三节	循环流化床锅炉分类	348
第二十九章	循环流化床锅炉基本原理	350
第一节	基本概念	350
第二节	流化床形成	354
第三节	炉内动力特性	356
第四节	煤燃烧与炉内传热	359
第三十章	循环流化床锅炉主要设备及作用	365
第一节	燃烧设备	365
第二节	物料循环系统	369
第三节	燃煤制备系统	377
第四节	风烟系统	383
第五节	除渣除灰系统	386
第三十一章	典型循环流化床锅炉介绍	389
第一节	芬兰奥斯龙公司 Pyroflow 型循环流化床锅炉	389
第二节	德国鲁奇公司鲁奇型循环流化床锅炉	391
第三节	美国福斯特惠勒公司 FW 型循环流化床锅炉	392
第四节	德国拔柏葛公司 Circofluid 型循环流化床锅炉	394
第五节	中国科学院工程热物理研究所研制的分级分离循环流化床锅炉	396
第六节	清华大学热能工程系研制的具有 S 型平面流分离器的循环流化床锅炉	400
第七节	哈尔滨工业大学研制的 75t/h 循环流化床锅炉	405
第八节	哈锅研制的 HG - 440/13.7 - L.YM25 循环流化床锅炉	408
第三十二章	循环流化床锅炉运行	412
第一节	循环流化床锅炉起动和停运	412
第二节	循环流化床锅炉运行调节	416
第三节	循环流化床锅炉运行中出现问题与处理	420

第一篇

通用基础知识

第一章 锅炉专业基础知识

第一节 流体力学基本知识

一、流体基本物理性质

流体是液体和气体的总称。流体力学是研究静止流体的力学规律和运动流体的能量转化及能量损失规律的一门学科。

在火力发电厂中，不但有很多热力设备的工作与流体力学有着密切关系，而且在这些设备和管路上还有不少压力计、流量计、测速表等测量仪器，也是根据水力学原理制成的。因此要学好专业课，必须掌握流体力学的基本知识。

流体的静止与运动规律不仅受到外部条件的制约，同时也与流体自身的物理性质有关。因此下面我们首先介绍一下流体的基本物理性质，其中包括：流体的流动性、惯性、压缩性、膨胀性和黏滞性。

（一）流体流动性

流体的流动性是流体的基本特性。它是在流体自身重力或外力作用下产生的，也是流体容易通过管道输送的原因。流体之所以有这样的特性，是由构成它的分子决定的。液体和气体分子间的引力同固体分子间的引力相比都是很小的，这是流体在力作用下容易产生流动的根本原因。液体分子间的引力比气体大，其分子间隙小，排列紧密，在压力变化不十分大的情况下，体积基本保持不变，所以液体称为不可压缩流体；气体则不然，分子间间隙大而且松散，在压力变化不大的情况下，体积就有明显的变化，所以气体称为可压缩流体。本书讲述的是不可压缩流体。

（二）流体质量与惯性

物体的质量是指物体所含物质的多少，物体所含物质越多，其质量越大，所含物质越少，其质量也就越小。物体的质量与惯性有一定的关系：物体质量越大，惯性越大；物体质量越小，则惯性也越小。物体受力后运动状态要发生变化，改变物体运动状态的难易程度说明物体惯性的大小，物体受力后容易改变运动状态，说明它惯性小，反之，惯性就大。

力是使物体运动状态改变的原因，即产生加速度的原因。对一定质量的物体，对它施加的作用力越大，则产生的加速度也越大；当加速度一定时，质量越大，则所需的作用力也越大。作用力、质量与加速度的关系如下

$$F = ma \quad (1-1)$$

式中 F ——作用力，N；

m ——物体的质量，kg；

a ——物体的加速度， m/s^2 。

加速度的含义是，一个运动的物体每秒钟内产生的速度变化量。比如一个运动物每秒速度的

增加量为 5m ，则加速度 $a = 5\text{m/s}^2$ ；若每秒的速度的减少量为 5m ，则加速度 $a = -5\text{m/s}^2$ 。单位为米每平方秒 (m/s^2)。

作用力的单位为牛顿 (N)，它的定义是使 1kg 质量的物体产生 1m/s^2 加速度的力，即 $1\text{N} = 1\text{kg}\cdot\text{m/s}^2$ 。

物体质量的大小取决于物体所含物质的多少，其所含的物质质量是不因物体所处的位置不同而改变的，所以物体的质量在任何地方都是一个恒定值。而物体的重量则不然，物体的重量是地球对它的吸引力。这个引力不仅与物体的质量有关，还与物体所处的位置有关。同一物体，距地心越远，则物体所受引力越小，重量也越轻；物体距地心越近，其引力就越大，物体就越重。

物体受地心引力，使落体产生一个加速度，物体所受引力越大，所产生的加速度也越大。物体的重力（重量）、质量与加速度的关系与式 (1-1) 相似，是它的一个特例，即

$$G = mg \quad (1-2)$$

式中 G ——物体的重量，N；

m ——物体的质量，kg；

g ——物体的重力加速度， m/s^2 。

流体和其他物体一样，同样具有质量和惯性。在流体力学中常常用到单位体积流体所具有的重量和质量的概念。

单位体积的流体所具有的质量称密度，用符号 ρ 表示，即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-3)$$

式中 ρ ——流体的密度， kg/m^3 。

在压力一定时，流体的密度随温度的增加而减小；当温度一定时，流体的密度随压力的增加而增加。

(三) 流体压缩性与膨胀性

流体体积的大小随它所受压力的变化而变化。作用在流体上的压力增加，流体体积将缩小，这称流体的压缩性。流体的压缩性是用流体的压缩系数来表示的，它表示在流体温度不变时，每增加单位压力，单位流体体积的缩小量，即

$$k_p = \frac{-\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} \quad (1-4)$$

式中 k_p ——流体压缩系数， $1/\text{Pa}$ ；

$\frac{\Delta V}{V}$ ——单位体积的缩小量；

Δp ——压力增加量，Pa。

流体的体积还随温度变化而变化，当温度升高时，则体积膨胀，这称流体的膨胀性。流体的膨胀性用流体的膨胀系数表示，它表示流体压力不变时，温度每增加 1K ，单位体积的增加量，即

$$\alpha_v = \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta t} \quad (1-5)$$

式中 α_v ——流体膨胀系数， $1/\text{K}$ ；

$\frac{\Delta V}{V}$ ——单位体积的膨胀量；

Δt ——温度增加量，K。

液体的膨胀系数和压缩系数一般都很小。水的压缩系数为万分之零点五左右，其膨胀系数在

100℃以下时，也很少超过万分之七。其他液体也有类似属性。当液体所受压力变化不大时，所引起的液体体积变化量很小，故液体称不可压缩流体。

(四) 流体黏滞性

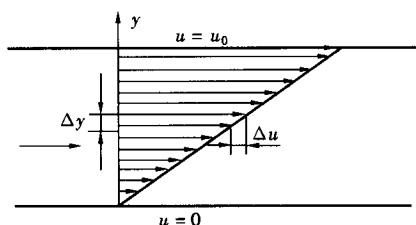


图 1-1 流体流速分布图

人们取两块大小相等的玻璃板，中间夹一层薄油层，将下一块玻璃板固定，然后拖动上一块玻璃板，我们会感到比较费力；如果将两块玻璃板中间换上一层水，然后以相同速度拖动上一块玻璃板，则感到费力较小，这说明油的黏性比水的黏性大。对同一种液体来说，拖动上一块玻璃板的速度越大，所需的力也越大。

现就图 1-1 表述的流体层内部的运动情况分析为：将上下玻璃板间的流体层分成极多的微层，当上玻璃板以 u_0 速度向前运动时，紧挨着上玻璃板的流体微层，由于黏附作用使这一流体微层与上玻璃板同样的速度运动，而紧挨着下玻璃板的流体微层则与下玻璃板一样，速度为零。显然流体各微层间存在着相对运动，并在层间产生内摩擦力。流体运动时，流体间产生内摩擦力的性质叫流体的黏滞性。内摩擦力具有阻止运动的性质，是流体运动时产生能量损失的原因。

由实验得出内摩擦力的公式如下

$$F = \mu A \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (1-6)$$

式中 F ——内摩擦力，N；

μ ——动力黏度，Pa·s；

A ——流层间接触面积， m^2 ；

$\frac{\Delta u}{\Delta y}$ ——垂直于运动方向的速度梯度， $1/s$ 。

气体的动力黏度，随温度的升高而升高；液体的动力黏度则随温度升高而降低。在电厂设备运行中，不同的设备对流体黏度要求不同，这要根据具体情况而定。比如锅炉燃烧重油时，为了降低油的黏度便于管路输送，输油前要在储油罐内预先加热至一定温度；在入炉前，为保证燃油的雾化质量，在油罐至锅炉的输油管路上装设油加热器，使油进一步升温。相反，对一些转动设备的轴承润滑，则要求油具有一定的黏度，以保证油膜的形成。所以，润滑油一般要求油温不超过 60℃，如果油温太高，黏度太小，妨碍油膜的形成，使轴与轴承之间产生直接摩擦，导致化瓦事故。

在工程计算中，常采用运动黏度，它的定义是动力黏度 μ 与其密度 ρ 的比值。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

式中 ν ——运动黏度， m^2/s 。

运动黏度 ν 的大小与流体的种类和温度有关，见表 1-1。

二、水静力学基本知识

(一) 液体静压力

如图 1-2 所示，在水坝的侧壁面上，任取一面积 A ，在此面积上作用着垂直力 F ，则作用在此单位面积的力称平均静压力，即

$$\bar{p} = \frac{F}{A} \quad (N/m^2) \quad (1-7)$$

若把此面积 A 无限地缩小，且趋向 O 点，那么在此无限小面积上的平均静压力，就是无限

小面积上的真实静压力，称此压力为点静压力。

$$p_0 = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{F}{A} \quad (\text{N/m}^2) \quad (1-8)$$

表 1-1 水与空气在标准压力下的运动黏度

温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	水		空气 $\nu \times 10^6$ (m^2/s)	温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	水		空气 $\nu \times 10^6$ (m^2/s)
	ρ (kg/m^3)	$\nu \times 10^6$ (m^2/s)			ρ (kg/m^3)	$\nu \times 10^6$ (m^2/s)	
0	999.87	1.79	13.70	60	983.24	0.48	19.60
10	999.73	1.31	14.70	70	977.81	0.42	20.45
20	998.23	1.01	15.70	80	971.83	0.37	21.70
30	995.67	0.81	16.60	90	965.34	0.33	22.90
40	992.24	0.66	17.60	100	958.38	0.30	23.78
50	988.07	0.55	18.60				

液体静压力具有如下特性：

第一个特性：液体静压力总是垂直并指向作用面的。这一特性可以通过演示实验得到证实，如图 1-3 所示。取一个乒乓球，在球面的不同方位开些小孔，再将球与注射器内充满水，将球与注射器如图 1-3 连接起来，推动注射器柱塞，就会发现球面上的水柱射向四面八方，其水柱皆与球的壁面相垂直。

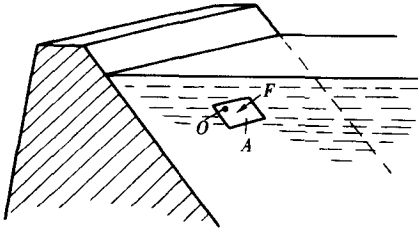


图 1-2 液体静压力

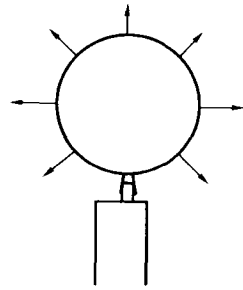


图 1-3 静压力特性

第二个特性：液体内任一点的各个方向的液体静压力均相等。

(二) 液体静力学基本方程式

静力学基本方程式是计算液体内任一点静压力的计算式。

如图 1-4 所示，有一方柱形盛有液体的桶，其横截面积为 A ，液面作用着压力 p_0 ，桶底向上作用着压力 p ，液柱高为 h ，液体密度为 ρ ，则由桶底向上的作用力等于液面上的作用力与液柱重量之和，即

$$pA = p_0A + \rho ghA$$

上式除以面积 A ，得

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1-9)$$

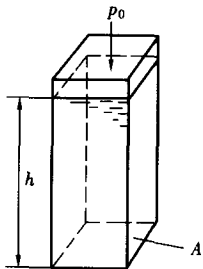


图 1-4 液柱压力 式中 p_0 ——作用在液面上的压力， N/m^2 ；

p ——液深为 h 处的静压力, N/m^2 ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

h ——液体深度, m ;

ρ ——液体密度, kg/m^3 。

上式称水静力学基本方程式。所求液体任一点的压力等于液面上的压力 p_0 加上液体密度、重力加速度、液柱高三者的乘积。在特定的情况下, p_0 与 ρ 是个常数, 这时液体的静压力只与深度 h 成正比, 即 h 越大, 静压力也越大。

在国际单位制中的压力单位为牛顿每平方米 (N/m^2), 用符号 Pa 表示, 称帕 [斯卡], 简称“帕”。它的定义是: 1N 的力均匀分布在 1m^2 面积上所形成的压力。

过去常用的压力单位还有工程大气压和物理大气压。

工程大气压: 1kg 的力均匀分布在 1cm^2 面积上形成的压力。

物理大气压 (标准大气压): 在纬度 45° 海平面上常年平均气压规定为物理大气压, 其值为 760mm 水银柱所产生的压力。几种压力换算表见表 1-2。

表 1-2 压力换算表

数值 \ 单位名称	标准大气压 (atm)	工程大气压 (at)	毫米汞柱 (mmHg)	帕 (Pa)	毫米水柱 (mmH ₂ O)
1 标准大气压 (atm)	1	1.0332	760	1.01325×10^5	1.0336×10^4
1 工程大气压 (at)	0.967841	1	735.559	9.80665×10^4	1×10^4
1 毫米汞柱 (mmHg)	0.00132	0.00136	1	133.3224	13.6
1 帕 (Pa)	0.987×10^{-5}	1.0197×10^{-5}	75×10^{-4}	1	0.102
1 毫米水柱 (mmH ₂ O)	9.6749×10^{-5}	10×10^{-4}	0.0736	9.81	1

锅炉上常用的压力单位为兆帕 (MPa), 其含义是百万帕。工程上常把一工程大气压近似写成 0.098MPa, 由此, 可把任一工程大气压换算成以兆帕为单位的压力。根据需要, 也可以 1000Pa 为单位, 写成 kPa。

【例 1-1】 如图 1-5 (a) 所示, 有一水管道, 管道上有一压力表, 表的指示压力 $p_0 = 196.14\text{kPa}$, 压力表距管子中心处距离为 1m, 求管子中心处静压力 p_B 。

解 此题的所求点压力 p_B 在已知点压力 p_0 之下, 这一点与静力学基本方程的情况完全相同, 故把已知数直接代入方程即可。水的密度 $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$, 则

$$p_B = p_0 + \rho gh = 196.14 + \frac{1000 \times 9.807 \times 1}{1000} = 205.94 (\text{kPa})$$

【例 1-2】 如图 1-5 (b) 所示, 当表的指示压力 $p_0 = 215.754\text{kPa}$ 时, 表距管子中心线仍为 1m, 求管子中心的静压力 p_B 。

解 此题所求点静压力在已知点之上, 所求点压力比已知压力小 ρgh 。

$$p_B = p_0 - \rho gh = 215.754 - \frac{1000 \times 9.807 \times 1}{1000} = 205.94 (\text{kPa})$$

根据上述例题可以得出以下结论: 当所求点在已知点之

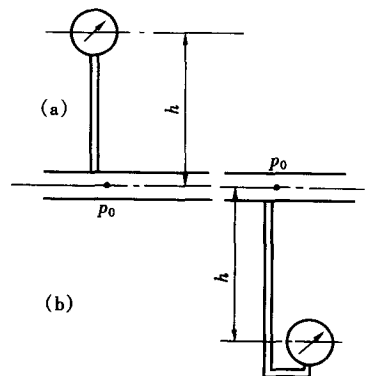


图 1-5 测管道压力