

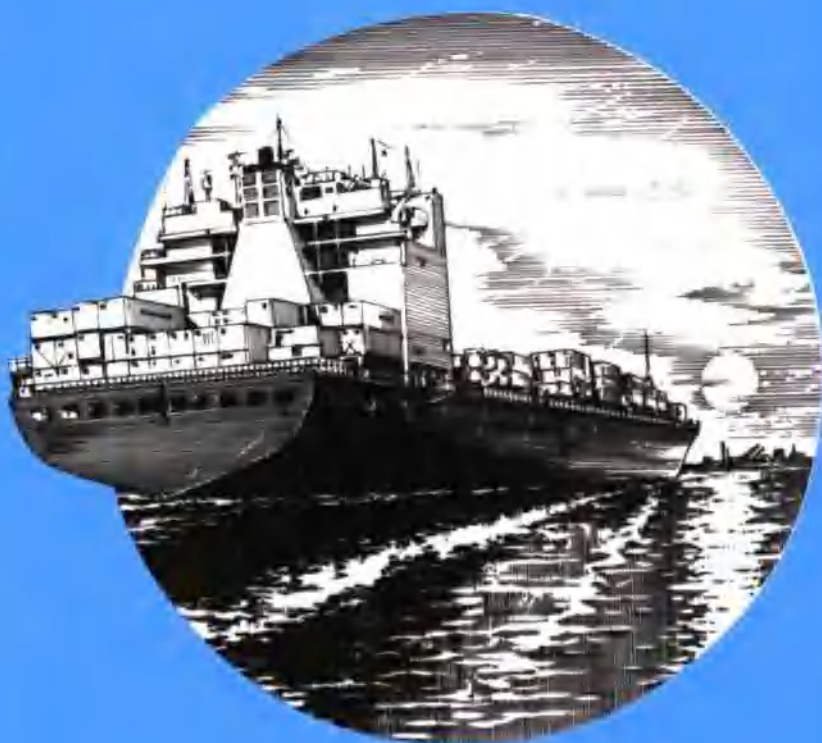


交通航海职业技术教育教材

符合 STCW 公约要求
交通职业技术学校教学指导委员会
航海类学科委员会推荐
交通部科技教育司审定
中华人民共和国海事局认可

热 工 基 础

王志信 主编
柴勤芳 主审



大连海事大学出版社

交通航海职业技术教育教材

热 工 基 础

王志信 主编

柴勤芳 主审

大连海事大学出版社

内 容 提 要

本书分四篇。第一篇流体力学讲述流体的主要物理特性、流体静力学基本方程、动力学基本方程、流体流动状态及在轮机工程中的应用。第二篇工程热力学阐述热力学基本概念,热、功相互转换的基本规律热力学第一定律、热力学第二定律,工质的热力性质,热力过程中工质的状态变化规律和能量转换关系,分析船舶机舱中热力设备的工作过程、循环及提高经济性的途径。第三篇传热学阐述热传递的基本方式、基本规律、传热过程、增强及阻碍热传递的因素及换热器的传热分析。第四篇船用仪表和单位讲述游标卡尺、千分尺、量缸表、拐挡表的精度、读数原理,船用温度计、压力表、转速表、流量计、密度计、盐度计、湿度计的工作原理及使用方法,热力工程中涉及量的SI制、工程制、英制单位和换算。

本书为航海类轮机管理专业(100~120学时)高等职业教育教材,也可作为轮机管理人员、企业科技人员及其他相关专业人员的培训、学习资料。

图书在版编目(CIP)数据

热工基础 / 王志信主编. —大连:大连海事大学出版社,1999(2006.9重印)

(交通航海职业技术教育教材)

ISBN 7-5632-1300-7

I. 热… II. 王… III. 热工学-专业学校-教材 IV. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 36766 号

大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌海路1号 邮编:116026 电话:0411-84728394 传真:0411-84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

大连理工印刷有限公司印装 大连海事大学出版社发行

1999年12月第1版 2006年9月第6次印刷

幅面尺寸:185 mm×260 mm 印张:14

字数:349千字 印数:13501~15500册

责任编辑:王铭霞 封面设计:王 艳

定价:25.00元

前 言

航海职业教育系列教材是交通部科教司为适应《STCW78/95 公约》和我国海事局颁布的《中华人民共和国海船船员适任考试、评估和发证规则》而组织编写的。编审人员是由交通职业技术学校教学指导委员会航海类学科委员会组织遴选的,具有较丰富的教学经验和实践经验。教材编写依据是交通部科教司颁发的“航海职业教育教学计划和教学大纲”(高职教育),也融入了中等职业教育的“教学计划和教学大纲”。本系列教材是针对三年高职教育和五年高职教育编写的,对于四年中等职业教育可根据考纲在满足操作级的要求上选用,也适用于海船驾驶员和轮机员考证培训和船员自学。

本系列教材包括职能理论和职能实践两个部分,在内容上有严格的分割,但又相互补充。

这套系列教材的特点:

1. 全面体现了《STCW78/95 公约》和《中华人民共和国海船船员适任考试、评估和发证规则》中强调的:教育必须遵守知识更新的原则,强调技能,培养能适应现代化船舶复合型人才要求的精神。

2. 始终贯穿“职业能力”作为培养目标的主线,根据“驾通合一”“机电合一”及课程内容不能跨功能块的原则,打破原有学科体系,按功能块的要求对课程内容进行了全面的调整、删减,抓住基本要素和重新组合。各课衔接紧凑,避免重复教学,并跟踪了现代科学技术,有较强的科学性和先进性。

3. 编写始终围绕着职业教育的特点,内容以“必需和够用”为原则,紧扣大纲,深广度适中,不但体现了理论和实践的结合,也体现了加强能力教育和强化技能训练的力度。

4. 编写过程中还把品格素质、知识素质、能力素质和身心素质等素质教育的内容交融并贯彻其中,体现了对海员素质及能力培养的力度。

本系列教材在编审过程中尽管对“编写大纲和教材”都经过了集体或专家会审,也得到海事局和航运单位的大力支持,但可能还有不足之处,希望多提宝贵意见,以利再版时修改并进一步完善。

交通职业技术学校教学指导委员会航海类学科委员会

1999.8

编 者 的 话

本书是根据交通部科教司 1998 年 10 月颁发的航海职业教育(适用高中后三年和初中后五年)教学计划与教学大纲和 1998 年 2 月国家海事局颁发的海船船员适任考试和评估大纲制定并讨论通过、上报航海学科委员会的教材编写大纲编写的。

作为贯彻 STCW78/95 公约和我国海船船员适任标准要求的高等职业教育教材,全书反映了海船轮机管理专业管理级船员培养目标对该职能课程的基本内容要求,并从加强实践教学的要求,尽量使理论联系轮机工程实际。

本书由广东航运学校汤荣生(第二章、第十章、第十五章、第十六章、第二十章第一节、第四节、第二十二章)、上海海运学校刘新尧(第四章、第十一章、第十四章、第十九章、第二十章第二节、第二十一章第一节、第二节)、福建船政学校林小东(第一章、第六章、第八章、第十七章、第二十一章第三节、第五节)、南通航运学校王志信(其余)分章、节编写,全书由王志信主编,由浙江交通学校柴勤芳主审,本书第一篇流体力学还邀请南通航运学校杨学辉审阅。教材编写中,得到交通中专航海学科委员会的指导,受到广东航运学校、上海海运学校、福建船政学校、浙江交通学校、南通航运学校领导及诸多同事的关心和帮助,在此谨向他们表示衷心的感谢!由于编者的理论水平、教学实践有限,特别对 STCW78/95 公约和海船船员适任标准要求的认识还不够深入,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

1999 年 4 月

目 录

第一篇 流体力学

导言	1
第一章 流体的主要物理性质	2
第一节 流体的密度和重度	2
第二节 流体的压缩性和膨胀性	3
第三节 流体的表面张力	4
第四节 流体的含气量与气体分离压	5
第五节 流体的粘滞性	6
第二章 流体静力学基本方程	9
第一节 流体的静压力及其特性	9
第二节 流体静力学基本方程	10
第三节 流体静力学基本方程的意义	11
第四节 等压面	12
第五节 流体静力学基本方程的应用	13
第三章 流体动力学基本方程	16
第一节 流体流动的几个基本概念	16
第二节 连续性方程	17
第三节 理想流体的伯努里方程	18
第四节 理想流体伯努里方程的意义	20
第五节 实际流体的伯努里方程	21
第六节 伯努里方程的应用	22
第四章 流体在管道中的流动	27
第一节 流体在管道中的流动状态	27
第二节 流动阻力与水头损失	29

第二篇 工程热力学

导言	31
第五章 基本概念	32
第一节 船舶热能转换装置的工作过程	32
第二节 工质和热力系统	33

第三节	热力系统的状态和状态参数	35
第四节	基本状态参数	36
第五节	准静态过程和可逆过程	39
第六节	功量和热量	40
第六章	理想气体的性质	43
第一节	理想气体的物理模型	43
第二节	理想气体状态方程	43
第三节	理想气体的热容和比热	46
第七章	热力学第一定律	50
第一节	热力学第一定律的实质与表述	50
第二节	储存能	50
第三节	封闭系统的能量方程	51
第四节	推动功、焓、轴功和技术功	53
第五节	稳动流动能量方程	54
第六节	稳定流动能量方程的应用	56
第八章	气体的热力过程	57
第一节	研究热力过程的目的和方法	57
第二节	定容过程	57
第三节	定压过程	59
第四节	定温过程	61
第五节	绝热过程	62
第六节	多变过程	65
第九章	热力学第二定律	70
第一节	热力学第二定律的表述与实质	70
第二节	卡诺循环	72
第三节	卡诺定理和熵的性质	74
第十章	气体的流动	77
第一节	喷管和扩压管的断面变化规律	77
第二节	喷管和扩压管中的流速和流量	80
第三节	喷管和扩压管在船舶上的应用	81
第四节	绝热节流和绝热滞止	82
第十一章	气体的压缩	84
第一节	单级活塞式理想压缩机的工作过程	84
第二节	容积效率及多级压缩的应用	85
第三节	叶轮式压缩机的工作过程	89
第十二章	气体动力循环	91
第一节	柴油机实际循环的理想化	91
第二节	混合加热循环	92
第三节	定容加热循环和定压加热循环	94

第四节	提高活塞式内燃机循环热效率的途径	96
第五节	提高柴油机功率的主要途径	97
第六节	燃气轮机装置的理想循环	101
第十三章	水蒸气的性质和热力过程	103
第一节	水的定压汽化过程	103
第二节	水和水蒸气的表和图	106
第三节	水蒸气的基本热力过程	108
第十四章	蒸汽压缩制冷循环	110
第一节	制冷剂的饱和蒸汽表和 $p-h$ 图	110
第二节	蒸汽压缩制冷循环	112
第三节	提高制冷循环经济性的途径	113
第十五章	湿空气	116
第一节	湿空气的性质	116
第二节	湿空气的焓和熵	118
第三节	湿空气的焓湿图	119
第四节	湿空气的热力过程	121

第三篇 传热学

导言	125
第十六章 稳定导热	127
第一节 导热的基本定律	127
第二节 导热系数	128
第三节 平壁和圆筒壁的导热	130
第四节 导热热阻	132
第十七章 对流换热	133
第一节 对流换热及基本公式	133
第二节 影响对流换热的因素	134
第三节 流体无物态变化时的换热	136
第四节 流体有物态变化时的换热	137
第十八章 辐射换热	140
第一节 热辐射的基本概念	140
第二节 热辐射的基本定律	142
第三节 气体辐射与火焰辐射	143
第四节 辐射换热的增强与削弱	143
第十九章 传热与换热器	145
第一节 传热过程	145
第二节 平壁和圆筒壁的传热	145
第三节 传热的增强与削弱	147

第四节 船用热交换器概述.....	149
第五节 热交换器的热计算.....	153

第四篇 船用量具、仪表和单位

导言.....	157
第二十章 船用量具.....	158
第一节 游标卡尺.....	158
第二节 千分尺.....	160
第三节 量缸表.....	162
第四节 拐挡表.....	164
第二十一章 船用仪表.....	165
第一节 测温仪表.....	165
第二节 测压仪表.....	167
第三节 转速表.....	170
第四节 盐度计.....	172
第五节 其他船用仪表.....	174
第二十二章 单位及换算.....	179
附录.....	182
附表 1 单位换算表.....	182
附表 2 饱和水与饱和水蒸气的热力性质表(按压力排列).....	183
附表 3 饱和水与饱和水蒸气的热力性质表(按温度排列).....	185
附表 4 未饱和水与过热水蒸气的热力性质表.....	187
附表 5 R12 饱和液体和饱和蒸汽表.....	191
附表 6 R12 过热蒸汽表.....	194
附表 7 R22 饱和液体和饱和蒸汽表.....	198
附表 8 R22 过热蒸汽表.....	200
附表 9 饱和空气表.....	204
主要符号表.....	206
附图 1 水蒸气 $h-s$ 图.....	207
附图 2 R12 的压-焓图.....	208
附图 3 R22 的压-焓图.....	209
附图 4 湿空气的焓-湿图.....	210

第一篇 流体力学

导 言

流体力学是以流体为对象,研究其平衡和运动基本规律的科学。主要研究流体在平衡和运动时的压力分布、速度分布、与固体之间的相互作用以及流动过程中的能量损失等。

流体包括液体和气体两部分,本篇从轮机管理的实际出发,阐述液体的平衡和运动规律,当气体在流速不大、压力不高、比容变化较小,压缩性影响可略去不计时,液体的各种规律对气体也是适用的。

人类对流体的认识最早是从水开始的,希腊哲学家阿基米德(公元前 287—212)的《论浮体》一书是最早的水力学著作,其中论述了著名的浮力定律,从那时起,流体力学成为一门独立的学科。16 世纪到 19 世纪初,由于资本主义的兴起和发展,特别是欧洲的产业革命,使流体力学得到了迅速发展。这一时期,帕斯卡证明了平衡流体中的压力传递规律,牛顿建立了流体摩擦定律,欧拉导出了描述理想流体运动的微分方程,纳维尔和斯托克斯推导了描述粘性流体运动的微分方程;与此同时,伯努里通过大量实验,总结和导出了流体流动过程中的能量转换基本关系,即著名的伯努里方程。从 19 世纪到 20 世纪末,工业生产突飞猛进,流体力学的研究重点不再局限于水、油、气的研究也受到高度重视。这一阶段,出现了雷诺对流动状态的实验研究,指出了流体的流动存在层流和紊流两种状态,并根据实验结果归纳了区别流动状态的准则数——雷诺数。

随着流体力学的发展,使用流体作工作物质的各类装置广泛应用,性能日趋完善。在船舶机舱中,水、燃油、滑油、液压油是轮机部不可缺少的工作流体;相应地,输液管道、阀件、液压系统、船用泵、锅炉、热交换器、测压仪表、流量计、密度计等设备的工作原理和性能提高都离不开流体力学基本规律的指导。所以,本篇作为培养轮机管理人材职能课程内容之一是十分必要的。

第一章 流体的主要物理性质

流体静止和运动的规律,一方面与流体所受到的外部条件有关,另一方面也取决于流体本身的内在物理性质,下面介绍流体的主要物理性质。

第一节 流体的密度和重度

一、密度

流体具有质量,占有体积,在均质流体中, 1m^3 体积内所具有的质量 m 称为密度,用符号 ρ 表示,即

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

流体的密度随流体的种类、压力和温度而变化,但是对同种液体来说,密度随压力和温度的变化较小,一般可视为常数,表 1-1 列出几种常用流体的密度。

表 1-1 几种常用流体的密度

流体种类	温度(℃)	密度(kg/m ³)	流体种类	温度(℃)	密度(kg/m ³)
蒸馏水	4	1000	海水	15	1020~1030
汽油	15	700~750	柴油	20	840~900
润滑油	15	890~920	重油	20	980
液压油	15	860~900	乙醇	15	790~800
水银	0	13600	空气	0	1.293

由上表可看出,油液的密度在同一温度时并不是定值,这是因为密度与油液中的化学成分和馏分组成有关:燃油成分中烷烃的密度最小,环烷烃稍大,芳香烃最大,含硫、氧、氮的胶质和沥青质密度更大。燃油的密度随馏分温度的增高而增大,油液的密度间接表示其粘度,燃油的密度大,则其粘度大,重馏分多。密度对燃油的管理工作有直接的意义,例如:知道了油舱的容积,就可以根据密度来计算其装载量。在轮机管理中,目前还采用被淘汰了的比重代替密度,燃油的比重为 20°C 时的燃油重量与 4°C 时同体积的水的重量之比,以 d_{40}^{20} 表示。若燃油比重(即密度)太大,则在使用离心式分油机分离油中的水和杂质时将遇到困难,一般的极限值为密度小于 0.98 或密度不大于 991 kg/m^3 。

二、流体的重度

流体在地心引力作用下,具有重量,在均质流体中, 1m^3 体积内的重量 G 称为重度,用符号 γ 表示,即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad \text{N/m}^3 \quad (1-2)$$

显然,重度与密度的关系为

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (1-3)$$

式中: g ——重力加速度,一般计算中取 $g=9.81 \text{ m/s}^2$ 。

例题 1-1 某燃料油质量 0.446 kg , 在 20°C 时测得其体积为 492 cm^3 , 求: ①油的密度和重度; ②按表 1-1, 判别该燃料油的种类。

解: 由式(1-1), 该油液的密度

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{0.446}{492 \times 10^{-6}} = 907 \text{ kg/m}^3$$

由式(1-3), 该油的重度

$$\gamma = \rho \cdot g = 907 \times 9.81 = 8898 \text{ N/m}^3$$

由表 1-1 知, 该燃料油为柴油。

第二节 流体的压缩性和膨胀性

流体受压体积减小密度增加的性质称为压缩性, 压缩性的大小用压缩系数来度量。

压缩系数用 β_p 表示, 它是指当温度不变时, 单位压力的变化所引起的体积相对变化量, 即

$$\beta_p = \frac{-\frac{dV}{V}}{\frac{dp}{p}} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad \text{m}^2/\text{N} \quad (1-4)$$

式中, dV 是因压力变化 dp 时所引起的体积变化量; V 是流体被压缩前的体积。负号表示体积变化与压力变化的方向相反, 当压力增大, 即 $dp > 0$ 时, 体积减小, $dV < 0$, 而 β_p 总为正。

压缩系数的倒数称为弹性模数(或弹性系数), 用符号 E_v 表示, 即

$$E_v = \frac{1}{\beta_p} = -\frac{dp}{\frac{dV}{V}} \quad \text{N/m}^2 \quad (1-5)$$

弹性模数表明: 处于压缩状态下的流体, 有一种向外产生膨胀力的倾向, 这种力可以被看成是一种弹性力。流体的体积弹性模数 E_v 和固体材料的弹性模数 E 意义相似, 单位也相同。显然, E_v 值越大, 流体压缩性越小, 愈难被压缩; E_v 值越小, 愈容易被压缩。

由实验知, 液体的压缩系数非常小, 如水在 0°C 和 1 个大气压时, 压缩系数 $\beta_p = 5.18 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$, 常用液压油的 $\beta_p = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ 。因此, 在工程实际中, 一般把液体视为不可压缩流体, 因而当往复泵的活塞与泵缸间液体被密封的时刻, 泵腔内的液体立即可达到排液压力。但是, 在高压情况下, 液体的压缩性也应予以考虑, 例如: 柴油在高压油管中由于油液的压缩性, 实际供入气缸的时刻将略滞后于柴油从喷油泵排出的时刻。液压系统在进行动态分析时, 也要考虑油液的压缩性。

二、膨胀性

在一定的压力下, 流体的体积随温度而改变的性质称为膨胀性。膨胀性的大小用体积膨胀系数来度量, 符号为 α_t , 则

$$\alpha_t = \frac{\frac{dV}{V}}{dt} \quad 1/^\circ\text{C} \quad (1-6)$$

即: 体积膨胀系数是指在压力不变的情况下, 温度增加 1°C 所引起的体积相对增加值。

与压缩性一样,液体的膨胀性也很小,除温度变化很大的场合外,在一般工程问题中不必考虑液体的膨胀性。例如:水在一个大气压力下,温度在 $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 范围内时, $\alpha_t = 1.5 \times 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$; 液压油的膨胀系数,一般在 $(8.2 \sim 6) \times 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$ 范围,其值与重度 γ 有关。从数值上看,液体的压缩性和膨胀性都是很小的,在实际情况下,当压力及温度变化不大时,可以认为液体的体积并不发生变化,认为液体既不可压缩又不能膨胀。但是,在压力及温度的变化很大时,如果仍旧把液体当做不可压缩不能膨胀,则会导致很大的计算误差,甚至发生错误。

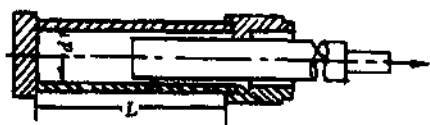


图 1-1 液压泵缸与柱塞

气体与液体不同,它具有显著的压缩性和膨胀性。气体体积随压力和温度而变化的规律,在第二篇工程热力学中专门论述。

例题 1-2 某液压系统的泵缸、柱塞间封闭液压油,油液体积膨胀系数 $\alpha_t = 6.5 \times 10^{-4} 1/^{\circ}\text{C}$, 泵缸内径 $d = 15 \text{ cm}$, 长 $L = 40 \text{ cm}$, 如图 1-1 所示。试求温度从 -20°C 升到 $+20^{\circ}\text{C}$ 时油液体积增大多少?

解: 由式(1-6), 增大的体积

$$dV = \alpha_t \cdot V \cdot dt$$

由题意, $dt = 20 - (-20) = 40^{\circ}\text{C}$

$$\text{泵缸最大体积} \quad V = \frac{\pi}{4} d^2 L = \frac{\pi}{4} \times 15^2 \times 40 = 7065 \text{ cm}^3$$

$$\text{因此} \quad dV = 0.00065 \times 7065 \times 40 = 183.7 \text{ cm}^3$$

显然,这一数值是不能不考虑的,否则,由于体积膨胀可能使液压油路及泵缸本身破裂,为了避免这种危险,应该安装热保险阀门。

第三节 流体的表面张力

液体的每个分子都受到其它分子的引力,此引力的大小与分子间距离 r 的平方成反比,若超过一定值 r ,则引力甚小可略去不计,以 r 为半径的球叫做分子作用球。

一、表面张力的性质

若分子距自由液面的距离等于或大于 r ,则其周围分子之引力恰好互相抵消,此分子平衡;反之,分子 m (如图 1-2) 距液面 NN 为 a , a 小于 r , 作 NN 面相对于 m 点的对称面 $N'N'$, 介于 NN 与 $N'N'$ 之间的分子对 m 的引力互相抵消,而分子作用球内 $N'N'$ 下之分子均有拉 m 点向下之力,在此力的作用下液面处的分子都力图向液体内收缩。如果没有周围容器的限制,则 NN 表面必然收缩为球面的一部分 nn , 如图 1-3。于是在液体表面 NN (如果收缩为 nn) 上产生应力,此应力称为表面张力。因此,表面张力是液体的自由表面上,由于受自由表面两侧分子引力不平衡,使自由表面上液体分子受到的极其微小的拉力。

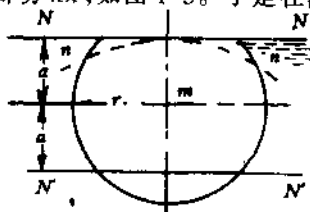


图 1-2 表面张力产生原因

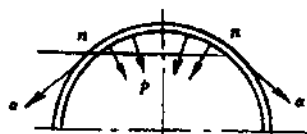


图 1-3 表面张力

表面张力的大小以作用在单位长度上的力,即表面张力系数

σ 表示,其 SI 单位为 N/m,液体的表面张力系数都很小。

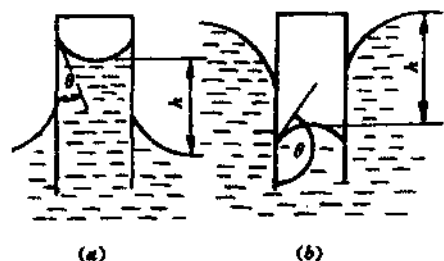


图 1-4 毛细管现象

二、毛细管现象

表面张力仅在液体自由表面存在,液体内部并不存在,所以它是一种局部受力现象。一般来说这种微弱的拉力对液体的宏观运动不起作用,在一般工程问题中都可不考虑。但是,毛细管张力可以引起相当显著的液面上升或下降,这就是毛细管现象。因此,在某些用玻璃管制成的水力仪表,如测压管中,必须考虑表面张力的作用。测压管中的毛细管现象,将造成读数误差,通常使用的管径不小于 10 mm,以减小读数

误差。

毛细管现象有两种情况,将毛细管插入液体内,因为液体与固体相接触时,存在附着力,所以,如果附着力大于液体分子之间的内聚力,如图 1-4(a)所示,液体表面与固体表面的接触角 θ 是锐角,这时液体称为能润湿固体的液体,例如水与玻璃的接触角 $\theta = 8^\circ \sim 9^\circ$,水是能润湿固体的液体;如果附着力小于内聚力,接触角 θ 是钝角,如图 1-4(b)所示,液体为不能润湿固体的液体。例如:水银与玻璃的接触角 $\theta = 139^\circ$,水银不能润湿固体。

由图 1-4 还可看出,对于毛细管,如果液体能润湿管壁,则管内液面升高;如果液体不能润湿管壁,则管内液面下降。毛细管中液面上升或下降的高度可根据表面张力在垂直方向的分力与升高液柱的重量平衡推导得到。例如:20℃ 时水在毛细管中的升高高度

$$h = \frac{29.8}{d} \quad \text{mm} \quad (1-7)$$

20℃ 时水银在毛细管中的下降高度

$$h' = \frac{10.15}{d} \quad \text{mm} \quad (1-8)$$

式中的 d 用毫米作单位。

由式(1-7)、式(1-8)可知,液柱上升(或下降)的高度与管直径成反比,并与液体种类及管子材料有关。

应该指出,气体没有表面张力及毛细管现象。

第四节 流体的含气量和气体分离压

一、含气量

液体中所含气体体积的百分比称含气量。液体中的空气可以是混入的或溶入的。例如:油液与空气接触并发生搅动,使气体在油液中以气泡状悬浮;油液中也总能溶入一些空气,油中溶入的空气量正比于液体压力而反比于温度,当压力增加或温度降低时可使部分混入的空气加速溶入油液中;当温度增加或压力下降时,溶解在油液中的空气也可以释放出来。

二、气体分离压

在某一温度下,流体的压力降低到从液体中析出气泡,则该压力称为气体分离压。气体分离压与液体的种类、温度、气体溶解量及混合量有关。液温高、气体溶入量和混入量大,气体分

离压则大。

三、含气量对液体的影响

油液中混入空气后,不仅使油液的体积弹性系数急剧下降,而且油液的粘性增加;溶入的空气对油液的体积弹性系数和粘性影响极小。

当采用压力容器作为液体的稳压源时,例如用压缩空气作为往复泵排出水的稳压源,空气因没有与水隔离就会被吸收到液体中,当高压液体流过阻力元件,流出后压力降低时,将使液体中的含气大量释放,若液体用在测量上,会造成测量误差,这是需要注意的。如果液体的压力降到使油液汽化沸腾,这时气泡从液体中大量分离的现象称空穴。发生空穴后,管道或元件中的液体变为混有大量气泡的不连续状态。液压系统中,当压力油流过节流器、喷嘴、阀或管路的狭窄缝隙时及在液压泵的吸入管路中,都会因油压骤降产生空穴。液压系统产生空穴后,气泡随油液流到高压区时,在高压作用下迅速破裂又渗入液体中,于是产生局部液压冲击,引起局部压力和温度的突变,使系统产生强烈的振动和噪音。在液压系统中某些局部地区和一些零件表面,因长期承受液压冲击和高温作用,以及油液中逸出气体的氧化作用,会使管壁和零件的表面剥落,或出现海绵状小洞穴群,这种因空穴现象造成的腐蚀称为气蚀。柴油机气缸冷却水腔、喷油泵中进、回油孔相应零件部位和排油阀、高压油管都会因空穴发生气蚀。

第五节 流体的粘滞性

流体在管道中流动时,由于与固体壁面间的附着力,紧贴管壁的流体速度为零,在液层发生相对运动时,运动较快的流体层可以带动运动较慢的流体层;反之,运动较慢的流体层又阻滞运动较快的流体层,这种发生在流体内部、类似于固体之间的摩擦阻力,称为流体的粘性。

一、牛顿内摩擦定律

流体流动时,两流层间的一对阻碍相对运动的等值反向摩擦力,叫做内摩擦力。根据牛顿研究的结果:流体在流动时所产生的内摩擦力与流体运动时的速度梯度成正比,与接触面积成正比,与流体的物理性质有关,而与接触面上压力无关。将此结果写成数学表达式,称为牛顿内摩擦定律:

$$T = \mu F \frac{d\omega}{dy} \quad \text{N} \quad (1-9)$$

单位面积上的内摩擦力(切应力)为

$$\tau = \mu \frac{d\omega}{dy} \quad \text{N/m}^2 \quad (1-10)$$

式中: T ——流体层接触面上的内摩擦力, N;

F ——流体层间的接触面积, m^2 ;

$\frac{d\omega}{dy}$ ——沿接触面法线方向的速度梯度,如图 1-5 所示, $1/\text{s}$;

μ ——表示流体物理性质的比例系数,称为粘性动力系数, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 即 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

τ ——单位面积流层接触面上的内摩擦力,即切应力, N/m^2 。

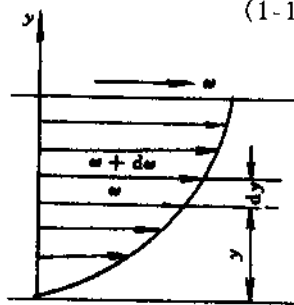


图 1-5 流体层流速分布

在静止液体中,由于速度梯度 $d\omega/dy=0$,内摩擦力为零,因此,液体在静止状态时不呈现粘性。还需说明的是:对于某些特殊液体(如胶状液体、接近凝固的石油、泥浆、油漆等)是不适用牛顿内摩擦定律的。为了区别,把符合牛顿内摩擦定律的液体叫做牛顿液体;反之称为非牛顿液体,即使对于牛顿液体,也仅仅是在作层流运动时才满足内摩擦定律。

二、动力粘度、运动粘度与相对粘度

1. 动力粘度 μ

由式(1-10)
$$\mu = \frac{\tau}{\frac{d\omega}{dy}} \quad \text{Pa}\cdot\text{s} \quad (1-11)$$

μ 的物理意义是:当速度梯度为 1 时,接触液层间单位面积上的内摩擦力。

2. 运动粘度 ν

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (1-12)$$

动力粘度 μ 与流体密度 ρ 之比称运动粘度。运动粘度 ν 没有什么特殊的物理意义,只是因为应用中动力粘度 μ 与密度 ρ 的比值常常出现,为方便,设立 ν 这一符号代替 μ/ρ 。因为 ν 的单位只有运动学的量而没有动力学的量,所以称它为运动粘度。运动粘度规定为国际通用的粘度表示法(cSt),工程上液体的粘度常用运动粘度的平均值来标志。例如:液压油的牌号按油液在 40℃ 时的运动粘度 ν (mm^2/s ——cSt,中文读作“厘沲”)表示,则 32 号液压油就是指它在 40℃ 时的运动粘度 ν 平均值为 32 cSt。我国旧标准柴油机滑油的牌号 HC-8、HC-11、HC-14、HC-16 按 100℃ 时的运动粘度(cSt)的平均值划分。1975 年,ISO(国际标准化组织)把滑油按 40℃ 时的运动粘度(cSt)值分为 18 个等级。1981 年经修正后的 SAE(美国汽车工程师协会)分类法把发动机滑油按粘度分成 10 个等级,每一等级的号码表示它的粘度范围,其冬用滑油是按 0°F(-18℃)时的粘度划分等级,夏用滑油是按 210°F(98.9℃)时的粘度划分等级。

3. 相对粘度

相对粘度是采用特定的粘度计在规定的条件下测出来的液体粘度。根据测量条件的不同,各国规定的相对粘度的单位是不同的。美国采用国际赛氏秒(SSU)、英国采用商用雷氏秒(°R)、我国和一些欧洲国家以前通常采用恩氏粘度(E)。

恩氏粘度由恩氏粘度计测定,它是将 200 cm^3 的被测液体装入底部有 $\phi 2.8 \text{ mm}$ 小孔的恩氏粘度计容器中,在某一测定温度 t ℃ 时,测定液体在自重作用下通过小孔所需的时间 $t_1 \text{ s}$,与同体积的 20℃ 蒸馏水流出同一小孔所需时间 $t_2 \text{ s}$ ($t_2 = 50 \sim 52 \text{ s}$) 之比值,即是该液体在 t ℃ 时的恩氏粘度。用符号 E_t 表示恩氏粘度,则

$$E_t = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-13)$$

恩氏粘度无量纲,工业上常用 20℃、50℃、100℃ 作为测定恩氏粘度的标准温度,并分别以相应的符号 E_{20} 、 E_{50} 、 E_{100} 表示。

雷氏粘度为油液在 100°F(37.8℃)时,从雷氏粘度计中流出 50 cm^3 所需的时间,单位为 s。雷氏粘度又有雷氏一号粘度(符号为 Red No1)和雷氏二号粘度(符号为 Red No2)两种。

赛氏粘度为油液在 100°F 时从赛氏粘度计中流出 60 cm^3 所需的时间,单位为 s。赛氏粘

度又分为赛氏通用粘度(SSU)和赛氏重油粘度(SSF)两种。

航运界也经常用雷氏 1 号粘度(s)表示燃油的粘度,大型低速柴油机的喷油设备,最适宜的粘度范围为 12~25 cSt,相当于雷氏 1 号粘度 60~100 s。

三、影响粘度的因素

流体的种类、温度和压力对动力粘度均有影响,压力的影响很小,通常液压油当压力大于 10×10^6 Pa 或压力变动较大时,需要考虑压力对粘度的影响。温度对流体粘度的影响很大,温度升高时液体粘度将显著降低,而气体的粘度反而增加。工程上对液压油和润滑油,希望油液的粘度随温度的变化越小越好,为此,仅以测定温度下的粘度来判断油液的性能是不够的,通常用粘度指数说明滑油的粘度特性,粘度指数大,表示温度变化时其粘度变化小。我国曾用粘度比来评定粘温特性,它是滑油在 50℃ 和 100℃ 时的运动粘度的比值,粘度比小,表示它在规定温度范围内的粘度变化小,质量好。

除润滑油、液压油需要保持一定的粘度范围外,对于柴油机和辅助锅炉,为使燃油雾化良好,也要保证燃油的粘度在一定范围内,在船舶上,采用对不同性质的燃油进行适当的加温,使燃油,特别是低质燃油的粘度达到要求。