

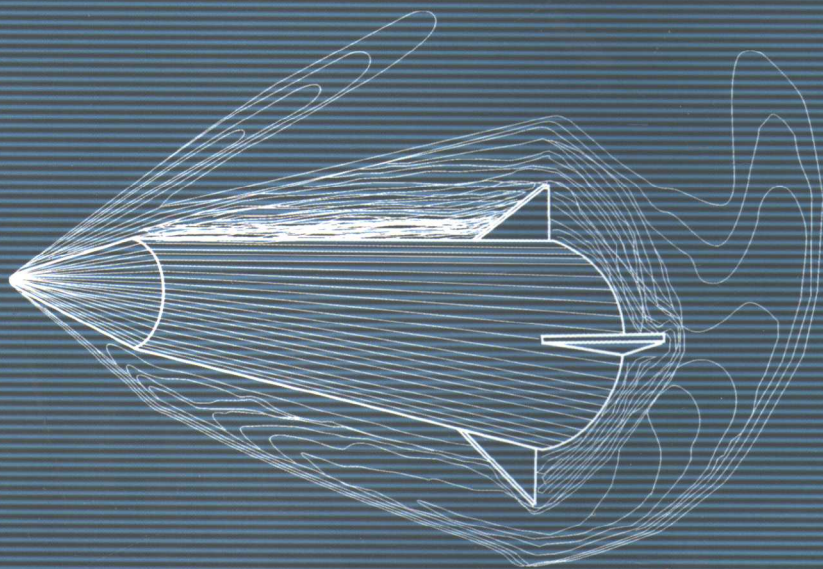
力学



国防科工委「十五」规划教材

粘性流体力学

● 阎超 钱翼稷 连祺祥 编著



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·力学

粘性流体力学

阎超 钱翼稷 连祺祥 编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

全书共分8章,主要论述粘性流体力学的基本概念、理论、方法和现象,讲述粘性流体力学理论的实际应用,介绍现代粘性流体力学的新成就以及存在的困难。本书力图使读者在全面学习粘性流体力学基本理论的基础上,掌握粘性流体力学的分析方法和研究思路,学会实际工程中粘性流体力学的分析和计算方法,了解粘性流体力学的当前进展、成就和存在的困难,以激发读者研究粘性流体力学的兴趣和独立探索思考的能力。

本书是针对航空航天院校流体力学、空气动力学及飞行器设计专业“粘性流体力学”课程要求所编写的教材。主要适用于高年级本科生和研究生,同时也可供高等院校、科研院所及研制设计部门有关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

粘性流体力学/阎超等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2005.8

ISBN 7-81077-640-1

I. 粘… II. 阎… III. 粘性流体—流体力学
IV. 0357

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 055245 号

粘性流体力学

阎超 钱翼稷 连祺祥 编著

责任编辑 宋淑娟

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: bhpress@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

开本:787×960 1/16

印张:12.25 字数:274千字

2005年8月第1版 2005年8月第1次印刷

印数:2500册

ISBN 7-81077-640-1 定价:17.00元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编 委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禄
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,



积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业



走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前言

粘性流体力学是流体力学的重要分支,已经有一百多年的发展历史。粘性流体力学广泛应用于航空、航天、海洋、船舶、大气、机械、水利、化工、环境保护和动力等各领域。

粘性流体力学同其他学科一样,伴随着现代科学技术的进步而不断发展。近半个世纪以来,粘性流体力学在湍流拟序结构和计算流体动力学等方面取得了很大的进展。本书力图反映这些方面的新成果,尤其是其在航空航天方面的新应用。其实不难发现粘性流体力学在人们身边的影子,如:

① 2004年3月29日,美国在人类航空航天史上,首次试飞成功了超燃冲压推进高超声速飞行器X-43,美国科学家称X-43将成为“莱特兄弟首次飞行以来航空技术的最重大突破”。在X-43飞行器研制的关键技术中,涉及很多粘性流体力学问题,包括湍流、转捩、激波/边界层干扰、边界层分离及其控制、靠近物面的薄激波层和熵层、由于激波压缩和粘性阻滞产生的气动加热、超燃的混合及燃烧等。

② 近20多年来,由于计算机技术的快速发展、计算技术的不断提高,计算流体动力学——CFD(Computational Fluid Dynamics)取得了很大的进步,逐渐成为粘性流体力学研究的主要手段之一。CFD无论在粘性流体力学的基础理论研究还是在工程应用中,都发挥着越来越大的作用,其特有的优点使其在湍流的直接数值模拟、转捩过程仿真、复杂流动数值模拟、分离及其控制、粘性减阻计算、非定常流动研究等方面都取得了很大的成就。

③ 近十几年来,仿生飞行、微型飞行器、游泳机器人、鲨鱼皮泳衣等受到了人们越来越多的关注。这些都是典型的粘性流体力学问题。

当然,粘性流体力学还有很多问题没有解决,如经典的湍流和转捩等基础问题。这些问题经过科学家们一百多年的努力,虽然取得了不少进展,但至今仍然还没有解决。



本书主要论述粘性流体力学的基本概念、理论、方法和现象,讲述粘性流体力学理论的实际应用,介绍现代粘性流体力学的成就和遇到的困难。其目的是:使读者在全面学习粘性流体力学基本理论的基础上,掌握粘性流体力学的分析方法和研究思路,学会实际工程中粘性流体力学的分析和计算方法,了解粘性流体力学的现代成就和存在的困难,激发读者研究粘性流体力学的兴趣和独立探索思考的能力。

作为一本面向高年级本科生和研究生的教科书,本书强调基础知识、掌握实际应用、引发思考探索、诱导读者兴趣、了解学科前沿;但不可能把粘性流体力学的前沿问题都涉及到。对粘性流体力学有兴趣的读者可以阅读书中所引用的参考文献。

本书共分8章。第1章介绍粘性流体运动所特有的物理现象:存在内摩擦,存在层流和湍流两种流态,实际物体绕流和管内流动中存在的分离现象。第2章介绍描写粘性流体运动的基本方程——Navier - Stokes方程,以及在一个特殊条件下的精确解,并导出了相似原理。第3章着重介绍边界层概念及其对流体力学的发展所起的里程碑作用,建立了边界层微分方程,求出了平板层流边界层的解析解。第4章介绍求解边界层流动的动量积分法。第5章介绍流动稳定性理论,试图从稳定性观点来解释转捩现象,详细讨论了流动稳定性及转捩的新方法和新成果。第6章介绍湍流的基本理论、雷诺应力张量、雷诺方程以及湍流模型,突出反映了湍流理论的新发展和新动态。第7章介绍将边界层理论应用于解决高速飞行器当前遇到的一些新问题。第8章介绍粘性流体力学的新手段——计算流体动力学(CFD)理论和技术的发展,讲述用数值模拟求解粘性流动问题的方法,并给出一些实例。在教学中,这些内容可视学时的多少而有所选择。

本书是针对航空航天院校流体力学、空气动力学及飞行器设计专业“粘性流体力学”课程要求所编写的教材。主要适用于高年级本科生和研究生,同时也可供高等院校、科研院所及研制设计部门有关专业人员参考。

由于作者水平所限,书中一定存在一些缺点和不足之处,恳请指正!

编 者

2005年3月

目 录

第 1 章 粘性流体运动概述

1.1 流体的粘性	1
1.2 雷诺实验及相似原理	2
1.3 圆管层流流动——Hagen - Poiseuille 流动	5
1.4 位流理论与实验结果的比较	14
习 题	15

第 2 章 粘性流体力学基础

2.1 应力及其符号规定,应力张量	17
2.1.1 应力和应力张量	17
2.1.2 微元矩形六面体表面上的应力及符号规则	17
2.1.3 过一固定点处任一截面上的应力	18
2.1.4 剪应力互等定理	19
2.2 应力的坐标转换方程式	21
2.2.1 空间应力的坐标转换方程式	21
2.2.2 平面应力的坐标转换方程式	23
2.3 应变率张量	24
2.3.1 流体微团运动的分解	24
2.3.2 直线应变率与剪切应变率	25
2.3.3 转动角速度	27
2.4 应变率的坐标转换方程式	28
2.4.1 平面应变率的坐标转换方程式	29
2.4.2 空间应变率的坐标转换方程式	30
2.5 应力与应变率之间的关系	32
2.5.1 三个假设(斯托克斯假设)	32
2.5.2 平面应力与应变率之间的关系	33
2.5.3 空间应力与应变率之间的关系	37
2.6 应力与应变率间关系的验证	38
2.7 纳维-斯托克斯运动微分方程	40
2.7.1 一般情况下的纳维-斯托克斯方程	40
2.7.2 不可压流的纳维-斯托克斯方程	41
2.7.3 不可压粘流问题的边界条件	42
2.7.4 可压缩粘性流动问题	42



2.8 粘性不可压流的相似律	42
2.8.1 两个粘性不可压流场完全相似的必要与充分条件	43
2.8.2 相似准则	45
2.9 两组相似流场间空气动力特性间的关系	46
2.10 一些相似准则的物理意义	48
2.10.1 计及粘性力的相似准则——雷诺数 Re	48
2.10.2 计及重力时的相似准则——弗劳德数 Fr	50
2.10.3 压力相似时的相似准则——欧拉数 Eu	51
2.10.4 非定常流动的相似准则——斯特劳哈尔数 Sr	51
2.11 粘性不可压层流问题解法概述	52
2.12 直圆管中的定常、不可压层流问题	53
习 题	58
第3章 平面流动的边界层方程及其解	
3.1 边界层概念的提出	60
3.2 平面不可压层流边界层微分方程	61
3.2.1 边界层流动图画	61
3.2.2 二维平板的边界层微分方程式	62
3.2.3 二维微弯曲面的边界层方程式	65
3.2.4 定常层流边界层问题解法概述	66
3.3 平板边界层的 Blasius 解	67
3.4 可压流边界层	73
3.4.1 温度边界层及气动热	73
3.4.2 高速、高温对边界层的影响	76
3.4.3 可压层流边界层的两个特解——完全气体定常流的 Crocco-Busemann 关系式	83
3.4.4 可压湍流边界层的两个特解	85
习 题	86
第4章 求解平面定常流边界层方程的近似方法	
4.1 概 述	88
4.2 平板边界层	89
4.2.1 动量积分关系式	89
4.2.2 平板层流边界层	93
4.2.3 关于连续介质的范围	96
4.2.4 平板湍流边界层	97
4.3 曲面边界层的分离现象	99
习 题	101
第5章 湍流的产生	
5.1 概 述	103



5.1.1 湍流的科学发现	103
5.1.2 湍流的主要特征、种类和研究方法	105
5.2 湍流的测量方法	106
5.2.1 热线风速计	107
5.2.2 示踪粒子显示法	108
5.3 稳定性理论	112
5.4 湍流的产生——层流边界层的转换	117
习 题	120
第 6 章 湍流理论和湍流拟序结构	
6.1 引 言	121
6.2 湍流统计理论和模式理论	122
6.2.1 湍流的平均值运算、关联函数和高阶矩	122
6.2.2 纳维-斯托克斯方程和雷诺方程	125
6.2.3 不可压流的雷诺应力方程及湍流动能方程	126
6.2.4 可压缩湍流的统计方程	128
6.2.5 湍流模式理论	130
6.3 湍流拟序结构	132
6.3.1 湍流拟序结构概况	132
6.3.2 湍流边界层的拟序结构	133
6.3.3 壁湍流的涡结构	138
6.3.4 自由剪切层的拟序结构	141
6.3.5 展 望	144
习 题	145
第 7 章 边界层理论的应用——SCT 的减阻	
7.1 引 言	146
7.2 超声速商用运输机的减阻问题	146
7.2.1 未来超声速商用运输机的性能指标	147
7.2.2 超声速运输机的层流化	148
7.2.3 影响超声速转换的因素及控制方法	150
7.2.4 超声速转换的理论计算	151
7.2.5 超声速层流风洞	153
7.2.6 超声速层流的飞行试验	155
7.2.7 结 论	156
7.3 高速飞行器气动热的工程估算	156
7.3.1 边界层外缘条件的确定	156
7.3.2 可压缩粗糙湍流边界层的工程计算方法	157
习 题	160



第8章 粘性流动的数值计算

8.1 引言	161
8.2 有限差分法介绍	164
8.2.1 差分网格划分	164
8.2.2 几种差商近似	164
8.2.3 差分格式	166
8.2.4 差分方程的相容性、稳定性、收敛性以及 Lax 等价定理	170
8.3 流体力学控制方程组的数学性质与双曲型方程的求解	171
8.3.1 偏微分方程的分类及其意义	171
8.3.2 双曲型方程的求解	172
8.4 目前 CFD 计算方法介绍	176
8.4.1 迎风格式和中心格式的比较	176
8.4.2 中心格式的发展	176
8.4.3 迎风格式的发展	177
8.4.4 计算格式的新进展	178
8.5 数值计算实例	178
习题	180

参考文献

第 1 章 粘性流体运动概述

1.1 流体的粘性

如图 1.1 所示,有流体在两块无限长的平行平板之间流动。此二平板距离为 h ,下板不动,上板以速度 V 沿图示之方向运动;二板之间的压强为恒值。实验表明,流体是“粘附”在两个壁面上的。因此,紧贴下板的那一层流体速度为 0,紧贴上板的那一层流体速度为 V 。实验还表明,保持上板以恒速 V 运动所需要的力,是与 $\frac{V}{h}$ 成正比的。这就是摩擦力或剪切力。单位面积平板所受的剪切力(即剪应力)以 τ 表示,则 τ 与 $\frac{V}{h}$ 成正比。实验又表明,两板之间的速度分布规律是直线,即

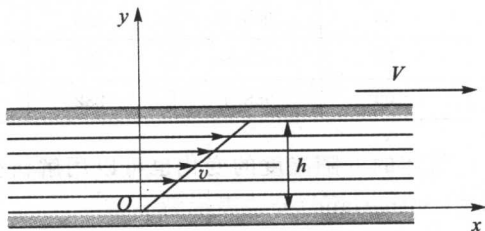


图 1.1 粘性流体在平板之间的速度分布

$$v(y) = \frac{y}{h}V \quad (1.1)$$

因此, τ 与 $\frac{V}{h}$ 成正比,也就是 τ 与 $\frac{dv}{dy}$ 成正比。若以 μ 表示这个比例系数,则流体所受的摩擦应力或剪应力 τ 可以写为

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1.2)$$

这个比例系数 μ 称为粘性系数,其大小与流体性质有关,还与温度有关。水和酒精这类流体的 μ 值较小,而滑油或甘油这类粘稠流体的 μ 值则较大。

式(1.2)称为“牛顿摩擦定律”,也可看做是粘性的定义。粘性系数 μ 的单位为

$$[\mu] = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} = \text{Pa} \cdot \text{s} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \quad (1.3)$$

粘性系数 μ 与密度 ρ 的比,称为运动粘性系数,记为 ν

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.4)$$

式中, ν 的单位为 m^2/s ,与力及质量无关,是运动学中的量。

水和空气的 μ 与 ν 的数值参见表 1.1。



表 1.1 水和空气的粘性系数及运动粘性系数

$t/^\circ\text{C}$	水			空气(0.099 MPa)		
	ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\mu \times 10^{-6}$ /($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	$\nu \times 10^{-6}$ /($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\mu \times 10^{-6}$ /($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	$\nu \times 10^{-6}$ /($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
-20	—	—	—	1.395	16.1	11.5
-10	—	—	—	1.344	16.6	12.4
0	999.8	1 781	1.785	1.293	17.1	13.2
10	999.7	1 307	1.306	1.248	17.6	14.1
20	998.2	1 002	1.003	1.205	18.1	15.0
40	992.2	653	0.658	1.128	19.0	16.8
60	983.2	466	0.474	1.060	20.0	18.7
80	971.8	354	0.364	1.000	20.9	20.9
100	958.4	282	0.294	0.946	21.8	23.1

气体的 μ 随温度的变化也可以用解析公式来近似表达。空气的 μ 与 T 的关系式常用萨瑟兰(Sutherland)公式表示为

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + C}{T + C} \quad (1.5)$$

式中, μ_0 是 $T = T_0 = 288.15 \text{ K}$ 时的 μ 值; C 是一个常数, 取 110.4 K 。此式在应用时有时不方便, 代之以一个指数关系近似表达为

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^n \quad (1.6)$$

式中的指数 n 在不同的温度范围内应取不同的值。在 $90 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$ 范围内, n 取 $\frac{8}{9} = 0.8889$; 若 $400 \text{ K} < T < 500 \text{ K}$, 则取 $n \approx 0.75$ 。

由表 1.1 可以看出, 空气的粘性(或粘性系数)是很小的。所以在处理空气的许多流动问题时, 第一步可以不计其粘性作用。这种不考虑其粘性的流体, 称为理想流体。

1.2 雷诺实验及相似原理

1.1 节介绍了流体的粘性以及计算粘性应力的牛顿摩擦应力公式(1.2), 此公式是否适用于粘性流体在任何情况下的流动呢? 不适用, 该式只适用于层流, 不适用于湍流。那么, 层流和湍流又是怎么回事?

英国人雷诺(Osborne Reynolds)在 1883 年用图 1.2 所示设备对粘性流体(即实际流体)的流态进行观察, 使水由水箱进入供观察流态用的试验管(圆玻璃管)内。为了清楚地看到流



体在管内的运动情况,他将颜色水通过一根细针管引入主流中。打开节门后,即可观察水在管内的运动情况。

多次实验表明,在一定的条件下,管内的染色液体并不与主流相掺混,而是像图 1.3 那样,染色液体伸展为一根细线,看起来好像一根拉紧了弦一样。如果用两三根针管将染色液引入主流,则可看到主流中有两三条染色线。显然,这只有当管内一切流体微团皆以互相平行(与管轴也平行)的方向运动时才会这样。正因为如此,流体微团之间才互不掺混,并以层状的方式运动。这种流态,称为层流。

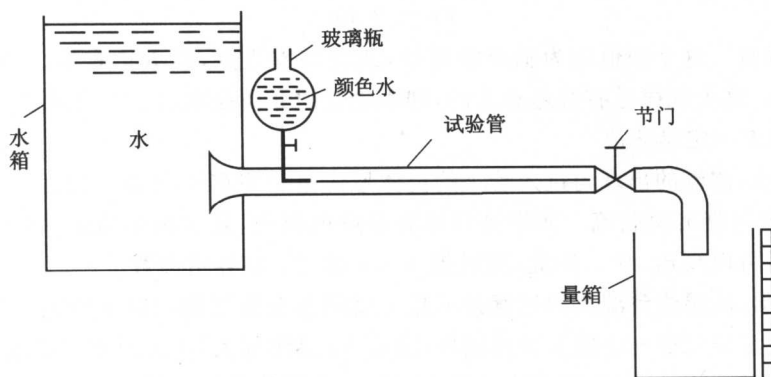


图 1.2 雷诺实验

在图 1.2 所示实验设备中,层流流态发生在节门开度较小的情况之下,也就是管内流速较低的情况。当节门开度加大到一定程度之后(流速增大了),层流流态开始发生变化。管内的染色流迹起初略起微波,继而产生个别漩涡,接着染色流迹被冲毁并与主流掺混起来,如图 1.4 所示。这种物理图画表明,在导管中,流体微团必有不规则的运动或所谓脉动运动(包括横向与纵向脉动)存在,否则不会出现这么紊乱的流动现象。这种具有不规则运动的流态,称为湍流(或紊流)。从层流到湍流的变化,称为转捩。

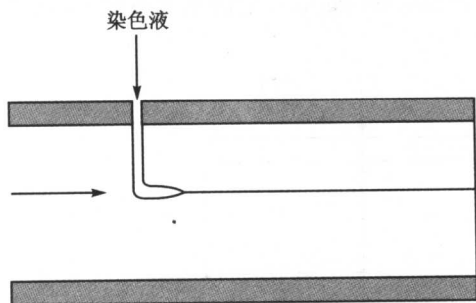


图 1.3 层流流谱

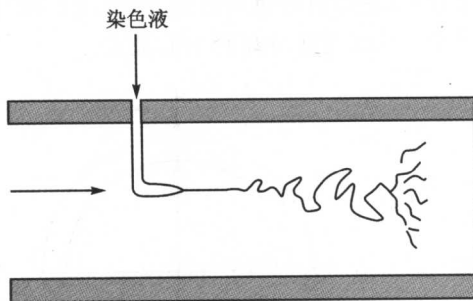


图 1.4 湍流流谱



多次实验发现,管中湍流的出现不是单纯地取决于平均流速 V 或管直径 D ,而是取决于所谓雷诺数这样一个组合数,符号是 Re ,定义为

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (1.7)$$

或

$$Re = \frac{V D}{\nu}$$

这是一个量纲一的数。在管子直接与水箱连接、入口处不用圆角的条件下,实验发现,当

$$Re \geq 2300 \quad (1.8)$$

时,就会出现湍流。这个数值称为临界雷诺数,或转捩雷诺数,以 Re^* 表示。当 $Re \geq Re^*$ 时,就会出现湍流。这个规律是有普遍意义的,即不论管内介质是水还是空气或是其他流体,只要 $Re \geq Re^*$,其流态一定是湍流。

实验还表明,湍流的出现与进入管子的流体原先是否安静也有很大关系。如果人为地给以扰动,则可能提前出现湍流。如果进口处有很好的圆角,且水箱中的流体几乎又是完全静止,则 Re^* 甚至可以高达 10^5 。因此,有时把 2300 称为下临界雷诺数。

实验还表明,从层流到湍流的过渡并不是一瞬间在全管之间同时出现的。当流动接近于临界状态时,层流是先在一小段上受到破坏,随着 Re 继续加大,才完全变成湍流。

总之,从雷诺实验可知,粘性流体的运动可以分成两种截然不同的流态:一种是层流,另一种是湍流。

至于说为什么当 $Re \geq Re^*$ 时就出现湍流,到目前为止,学术界尚未完全弄清楚。有一种理论是从运动稳定性来解释的。说的是,当 Re 达到一定的数值以后,若有任何偶然的外界因素对层流运动施以极微弱的扰动,那么,随着时间的进展,扰动强度将会迅速增大,从而使层流运动失去稳定性;而在 Re 值较小时($Re < Re^*$),层流运动则是稳定的。不过,本课程不拟对此做深入的讨论。下面,举例说明怎样判断流态。

例 1.1 某种冷却剂在环形圆管内流动(图 1.5),管的内径 $D=155 \text{ mm}$,冷却套缝隙 $\delta=2 \text{ mm}$,冷却剂的质量流量 $\dot{m}=1.02 \text{ kg/s}$,密度 $\rho=154.08 \text{ kg/m}^3$,运动粘性系数 $\nu=0.25 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,试判断冷却套中的流态。

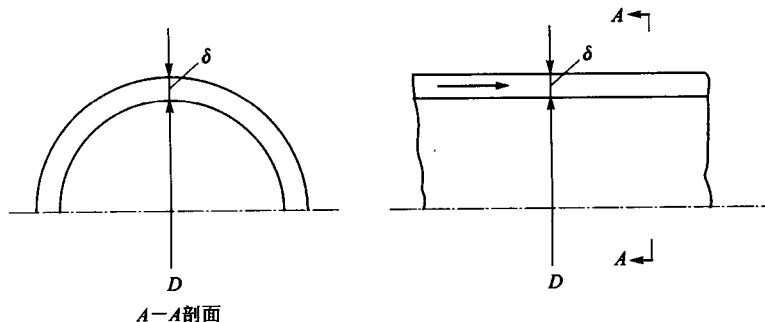


图 1.5 环形管内的流动