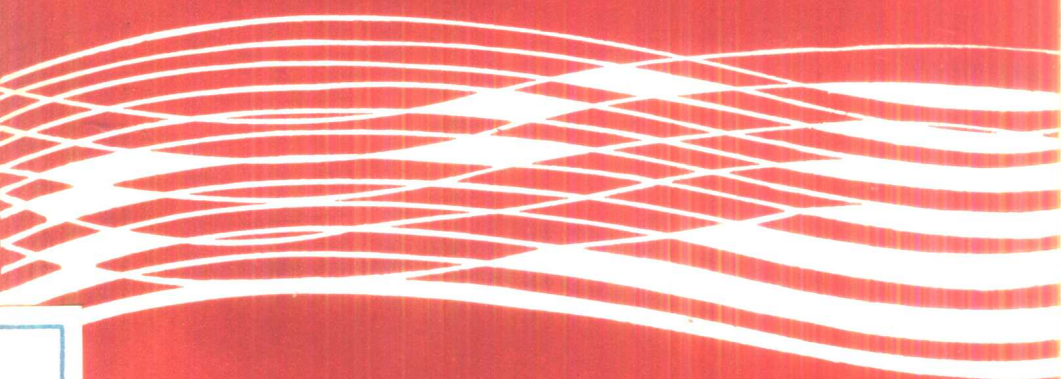


# 粘性流体力学

〔日〕 生井武文 井上雅弘 著



海洋出版社

# 粘性流体力学

〔日〕生井武文 井上雅弘 著

伊增欣 译

崔荣林 校

海洋出版社

1984年·北京

## 内 容 简 介

本书结合当代最新理论和实验研究成果,系统地讲授了粘性流体理论和处理实际问题的方法。

全书共七章。前四章介绍粘性流体的基本性质、基本方程、层流与湍流的特征、层流稳定性及向湍流的过渡;第五章详细叙述了层流及湍流边界层的各种解法(包括数值解法);第六、七章应用粘性流体理论较详细地研究了与工程实际联系十分密切的内部流动和外部流动。

本书重点在边界层理论方面,不仅讨论了二维层流和湍流边界层,而且对轴对称边界层、轴对称物体旋转时的扭曲边界层都作了详细的叙述,并结合纳维-斯托克斯方程及湍流边界层的求解,介绍了差分法和有限元法的应用。

本书物理概念清晰,数学推导简明,图文并茂,各章均附有例题并指出进一步深入研究的方向和方法。

本书可供力学专业和航空、船舶、海洋、水利、石油、地质、流体机械、热能工程等有关专业大学生及研究生作为教材,也可供从事有关专业工作的教师和科技人员参考。

## 粘 性 流 体 力 学

(日)生井武文 井上雅弘 著

伊增欣 译

崔荣林 校

海洋出版社出版

(北京复兴门海贸大楼)

中国科学技术情报研究所印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1984年4月第1版

1984年4月第1次印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 10 9/16

字数: 200,000

印数: 1—7,000

统一书号: 13193·0180 定价: 1.55元

## 序 言

远在公元前就已出现的水力学，虽然已经带有不少现代化的色彩，但是，有一个带根本性的问题却始终没有得到妥善的解决，那就是必须通过修正系数来修正理论值与实测值之间的差异。因此，即使对于可作为一维流动处理的问题，要想把实际现象从本质上予以系统化并进行理论处理，水力学也是无能为力的。对于粘性影响不能忽略情况下水和空气等的流动，应用理想流体动力学不能得到满意的解答。在这个意义上，要想用理论方法处理工程实际中的流动问题，并得到与实测值非常一致的解，那么粘性流体力学，特别是边界层理论，就成为一种有力的手段，所以十分重要，而对初学者来说，却往往感到复杂难懂。

本书是介绍牛顿流体力学基础知识及其应用的专业书，可作为大学本科或研究院的教材，也可供有关工程技术人员参考。书中着重对经常遇到的湍流和湍流边界层作了深入浅出的阐述。此外，每章都附有例题，以助读者理解。在学习本书的过程中，若由于时间关系，不妨略去正文中小号字的段落。本书全部采用国际单位制(SI)。

在此，谨向整理、誊清原稿的笠美惠子及协助出版工作的理工学社的関口傳氏、吉助久氏表示感谢。

著 者

一九七八年三月

# 目 录

## 第一章 粘性流体的性质

|                           |      |
|---------------------------|------|
| 1.1. 粘性流体力学的发展 .....      | (1)  |
| 1.2. 流体的粘性 .....          | (2)  |
| 1.3. 流体的运动与变形 .....       | (8)  |
| 1.4. 流体的内部应力 .....        | (12) |
| 1.5. 内部应力与作功 .....        | (18) |
| 1.5.1. 作用在单位质量流体上的力 ..... | (18) |
| 1.5.2. 内部应力作的功 .....      | (19) |
| 1.6. 粘性系数和热传导率 .....      | (21) |
| 例题 .....                  | (23) |

## 第二章 粘性流体的基本方程式

|                                                       |      |
|-------------------------------------------------------|------|
| 2.1. 描述流体运动的方法 .....                                  | (28) |
| 2.2. 流动过程中物理量的变化 .....                                | (29) |
| 2.3. 连续方程——质量守恒定律 .....                               | (32) |
| 2.4. 纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程(运动方程)——动<br>量守恒定律 ..... | (33) |
| 2.5. 能量方程——能量守恒定律 .....                               | (38) |
| 2.5.1. 流体力学的能量方程与热力学第一定律 .....                        | (38) |
| 2.5.2. 不可逆损失与热力学第二定律 .....                            | (40) |
| 2.6. N.S.方程和能量方程的积分 .....                             | (42) |
| 2.6.1. 动量(积分)方程式 .....                                | (42) |
| 2.6.2. 推广的柏努利方程式 .....                                | (43) |
| 2.7. 涡量输运方程式与涡的运动 .....                               | (46) |
| 2.7.1 涡量输运方程式 .....                                   | (46) |

|                     |      |
|---------------------|------|
| 2.7.2. 涡的运动 .....   | (48) |
| 2.8. 基本方程式的简化 ..... | (50) |
| 例题 .....            | (52) |

### 第三章 层流

|                                             |      |
|---------------------------------------------|------|
| 3.1. 雷诺相似准则、层流和湍流 .....                     | (59) |
| 3.2. 层流的准确解 .....                           | (63) |
| 3.2.1. 两平行平板间的流动 .....                      | (64) |
| 3.2.2. 两平行平板间的温度分布 .....                    | (66) |
| 3.2.3. 圆形套管之间的流动 .....                      | (69) |
| 3.2.4. 突然起动的平板附近的流动 .....                   | (72) |
| 3.3. N.S. 方程的数值解法 .....                     | (74) |
| 3.4. 缓慢流动 .....                             | (83) |
| 3.4.1. 斯托克斯 (Stokes) 流动和奥森 (Oseen) 流动 ..... | (83) |
| 3.4.2. 滑动轴承内的流动 .....                       | (86) |
| 例题 .....                                    | (89) |

### 第四章 湍流

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| 4.1. 湍流的性质 .....                   | (98)  |
| 4.2. 湍流的基本方程式 .....                | (101) |
| 4.2.1. 对于平均流动的连续方程、运动方程和能量方程 ..... | (101) |
| 4.2.2. 由基本方程式诱导出的各种方程式 .....       | (104) |
| 4.3. 湍流的测量与分析解法 .....              | (107) |
| 4.3.1. 湍流的测量 .....                 | (107) |
| 4.3.2. 相关函数解法 .....                | (109) |
| 4.3.3. 频谱分析法 .....                 | (111) |
| 4.4. 湍流的发生 .....                   | (112) |
| 4.4.1. 从层流向湍流的过渡 .....             | (112) |
| 4.4.2. 层流的稳定性 .....                | (114) |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| (1) 能量法 .....               | (115) |
| (2) 小扰动法 .....              | (116) |
| 4.5. 湍流理论 .....             | (119) |
| 4.5.1. 狭义的湍流理论 .....        | (119) |
| 4.5.2. 输运理论——半经验理论 .....    | (121) |
| (1) 动量输运理论 .....            | (123) |
| (2) 涡量输运理论 .....            | (125) |
| (3) 卡门 (Kármán) 相似性假定 ..... | (126) |
| (4) 根据输运理论求剪切湍流的速度分布 .....  | (129) |
| 例题 .....                    | (134) |

## 第五章 边界层

|                                          |       |
|------------------------------------------|-------|
| 5.1. 边界层的性质与基本方程式 .....                  | (140) |
| 5.1.1. 边界层的概念 .....                      | (140) |
| 5.1.2. 边界层方程式 .....                      | (142) |
| 5.1.3. 边界层的性质与分离 .....                   | (148) |
| 5.1.4. 边界层的厚度 .....                      | (151) |
| (1) 排移厚度 .....                           | (151) |
| (2) 动量厚度 .....                           | (152) |
| (3) 能量消散厚度 .....                         | (152) |
| 5.1.5. 边界层的动量(积分)方程式和能量(积分)方程式 .....     | (154) |
| 5.2. 层流边界层 .....                         | (157) |
| 5.2.1. 层流边界层的相似性 .....                   | (157) |
| 5.2.2. 边界层的相似性解——平板的布拉修斯(Blasius)解 ..... | (162) |
| 5.2.3. 速度分布不相似情况下的解法 .....               | (170) |
| 5.2.4. 动量(积分)方程式的解法 .....                | (173) |
| 5.3. 层流边界层的稳定性与向湍流的过渡 .....              | (181) |
| 5.4. 湍流边界层 .....                         | (188) |
| 5.4.1. 湍流边界层的构造 .....                    | (189) |

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 5.4.2. 湍流边界层的速度分布 .....               | (191) |
| (1) 速度分布的普遍定律 .....                   | (191) |
| (2) 湍流区的对数定律 .....                    | (195) |
| (3) 内层的壁面定律 .....                     | (197) |
| (4) 外层的速度分布与尾流定律 .....                | (202) |
| (5) 指数定律 .....                        | (205) |
| 5.4.3. 平板的摩擦系数 .....                  | (206) |
| (1) 边界层方程的解 .....                     | (206) |
| (2) 动量 (积分) 方程式的解 .....               | (208) |
| (3) 平均摩擦系数 .....                      | (211) |
| (4) 粗糙平板的摩擦系数 .....                   | (213) |
| 5.4.4. 湍流边界层的解法 .....                 | (217) |
| (1) 差分方程式解法 .....                     | (217) |
| (2) 积分方程式解法 .....                     | (219) |
| 5.5. 轴对称边界层 .....                     | (224) |
| 5.5.1. 长圆柱周围的边界层 .....                | (224) |
| (1) 层流的情况 .....                       | (224) |
| (2) 湍流的情况 .....                       | (226) |
| 5.5.2. 旋转圆板上的边界层 .....                | (228) |
| (1) 层流的情况 .....                       | (228) |
| (2) 湍流的情况 .....                       | (232) |
| 5.5.3. 轴对称边界层的基本方程式和动量 (积分) 方程式 ..... | (234) |
| 5.5.4. 静止轴对称物体的边界层 .....              | (236) |
| (1) 层流的情况 .....                       | (236) |
| (2) 湍流的情况 .....                       | (238) |
| 5.5.5. 扭曲边界层 .....                    | (239) |
| 5.6. 边界层理论的推广 .....                   | (241) |
| 5.7. 边界层控制 .....                      | (242) |
| (1) 绊线 .....                          | (243) |



|                   |       |
|-------------------|-------|
| (2) 涡旋发生器 .....   | (243) |
| (3) 外壳处理 .....    | (243) |
| (4) 由多孔壁吸入 .....  | (243) |
| (5) 由窄缝吸入 .....   | (244) |
| (6) 由窄缝吹出 .....   | (245) |
| (7) 缝翼 .....      | (245) |
| (8) 异种气体的喷出 ..... | (245) |
| (9) 壁面冷却 .....    | (245) |
| 例题 .....          | (245) |

## 第六章 内部流动

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 6.1. 圆管中的流动 .....            | (258) |
| 6.1.1. 起始段与充分发展的流动 .....     | (258) |
| 6.1.2. 圆管中充分发展的流动 .....      | (259) |
| (1) 层流的情况 (哈根-泊阿苏依流动) .....  | (260) |
| (2) 湍流的指数定律 .....            | (261) |
| (3) 湍流的对数定律 .....            | (264) |
| (4) 壁面粗糙度的影响 .....           | (268) |
| 6.1.3. 起始段的流动 .....          | (269) |
| 6.2. 非圆形截面的管子及弯曲管道中的流动 ..... | (270) |
| 6.2.1. 管摩擦系数 .....           | (270) |
| 6.2.2. 二次流 .....             | (272) |
| 6.3. 扩散器中的流动 .....           | (274) |
| 6.3.1. 扩散流与收缩流 .....         | (274) |
| 6.3.2. 扩散器中的流动及其性能 .....     | (275) |
| 6.3.3. 扩散器性能的预测 .....        | (278) |
| 例题 .....                     | (280) |

## 第七章 外部流动

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| <b>7.1. 射流</b>          | (285) |
| 7.1.1. 自由射流的构造          | (285) |
| 7.1.2. 射流的基本理论          | (289) |
| (1) 射流的基本方程式 动量与卷吸量     | (289) |
| (2) 关于射流特征量的量纲分析        | (292) |
| (3) 射流剪应力的相似性           | (294) |
| 7.1.3. 射流的速度分布          | (295) |
| (1) 二维射流                | (295) |
| (2) 圆形射流                | (298) |
| 7.1.4. 关于射流特征量的实验常数     | (300) |
| <b>7.2. 尾流</b>          | (302) |
| 7.2.1. 尾流的形成            | (302) |
| 7.2.2. 物体远处尾流的速度分布      | (303) |
| 7.2.3. 混合损失             | (308) |
| 7.2.4. 尾流中涡的产生          | (310) |
| (1) 卡门涡列                | (310) |
| (2) 兰彻斯特 (Lanchester) 涡 | (312) |
| <b>7.3. 物体的阻力</b>       | (313) |
| 7.3.1. 阻力的种类            | (313) |
| 7.3.2. 二维物体的形状阻力        | (314) |
| (1) 贝茨 (Betz) 方法        | (314) |
| (2) 琼斯 (Jones) 方法       | (316) |
| 7.3.3. 型阻的预测            | (317) |
| <b>例题</b>               | (319) |

# 第一章 粘性流体的性质

处理有关流体问题的工程技术人员必须精通流体力学。作为第一步，掌握流体粘性与流动现象的关系是十分重要的。因为一切客观存在的流体都有粘性，所以对这些流体的运动来说它是非常重要的性质。

## 1.1. 粘性流体力学的发展

一切物质的状态分为固体、液体和气体。液体和气体由于无限小的应力就会引起连续变形，而且容易流动，所以统称之为流体。固体在弹性范围内的剪应力与剪切变形成比例，去掉了力它就会恢复原状；而流体的剪应力则依赖于剪切变形速度。由于剪切变形速度是速度梯度，所以在有速度梯度的流场中就会产生流动阻力，通常把这种阻止流体运动的性质叫做粘性。由于流体在运动（或物体在流体中运动）时流场中一定存在速度梯度，所以在流体力学中粘性是一种非常重要的性质。

流体力学起源于阿基米德（Archimedes, B.C., 278—212）对于浮力的研究。如果当初他不是仅仅从静力学观点来观察浮力，而是还着眼于上浮速度的话，粘性流体力学也许会更早地被建立起来了。据说在罗马时代就已经有了考虑到粘性阻力而建设起来的明渠，可惜的是关于这方面的科学资料没能保存下来。直到很久以后的文艺复兴时代，达·芬奇（Leonardo da Vinci, 1452—1519）才留下了有关波动、溅水、涡内部的速度分布、物体尾流中涡的形成、以及用流线型物体减阻等方面的文字记载，恐怕这些就是有关粘性流体的最古老文献了。但是最早的有关粘性的研究则起源于马利奥蒂（Mariotte, 1620—1684）利用直流风洞来测定阻力。1687年牛顿（Newton）发现了运动流体的阻力（即剪切力）是与速度梯度成正比的，这就是把水和空气等粘性流体称为牛顿流体的原因。在十八、十九世纪期间，水力学发展起来了，柏努利（Bernoulli）、凯茨（Chezy）、哈根（Hagen）、达西（Darcy）、维斯巴哈（Weisbach）、伯森（Bazin）、雷诺（Reynolds）等

人留下了有关粘性流体的出色的实验研究成果。但在流体力学领域中，对于忽略粘性的理想流体欧拉(Euler)运动方程(1755)却始终只作纯数学的处理，而与实用性很强的水力学截然分开了。在欧拉运动方程中加上粘性项的尝试首先是纳维(Navier, 1827)进行的，经过柯西(Cauchy)、波阿松(Poisson, 1829)、维纳特(Venant, 1843)等人的研究，最后由斯托克斯(Stokes, 1845)完成。因此称粘性流体运动的基本方程为纳维-斯托克斯方程，简称N. S. 方程。它数在学上是很难求解的，直到现在，对于简单的边界条件也不过才有七十多个准确解。近年来应用电子计算机求出的N. S. 方程的数值解正在大量发表，但很难说它们都已经达到了实用的程度，当然也就没有得到很高的评价，尤其那些在计算技术还不太发达时得到的数值解更是如此。另一方面，达朗勃(D'Alembert)佯谬，即非粘性流体中运动物体的阻力变为零与物体在低粘性流体中运动的实验事实之间的矛盾，于1904年由普朗特(Prandtl)解决了。他提出了只在物体附近的流动中考虑粘性的边界层理论。随后，以布拉修斯(Blasius)、普尔豪森(Pohlhausen)、卡门(Kármán)、泰勒(Taylor)为代表的学者们对于边界层又进行了大量的研究。随着湍流理论的进步，粘性流体力学得到了显著的发展，其成果对许多工程实际问题的解决起了很大的作用。

## 1.2. 流体的粘性

在实际流体中运动的物体一定会受到阻力的作用，同时，流体在通过管道或流体机械的流动过程中必然伴随有压力损失。这些阻力和损失大部分产生于由粘性引起的流体摩擦和流动分离。下面就从分子运动论的观点对作用于流体及固体表面的流体摩擦予以简单说明。流体的分子运动与流动方向的平均前进运动不同，它还伴有微观不规则的热运动。固体分子的热运动是在相对固定的平衡位置附近的振动，而流体分子一撞到固壁，就失去了动量的平均前进分量，使它在固体表面的平均速度变为零，这就是无滑动条件。从固体表面反射的流体分子通常和距离固壁只有平均自由程的其他分子发生碰撞而得到动量的前进分量，再次碰撞固体表面，则又会失去

前进分量。另一方面，由于和固体表面反射的分子相碰撞而使平均速度减慢了的流体分子，再与远离固体表面处的流体分子发生碰撞，也会进行动量交换。一边重复着这样一个过程一边流动，随着离开固体表面距离的增加，流体分子的平均速度将逐渐增大。事实上不仅在固体表面附近，而且只要流体分子的平均速度有差异，即有速度梯度，便可以看到上述现象。

剪切流动的流体摩擦微观上取决于上述分子运动，例如观察一个大气压下 $0^{\circ}\text{C}$ 的大气，由于一立方微米体积中含有 $2.7 \times 10^7$ 个分子，所以可把它看作是连续体。人们就把作为流体运动最小单位的流体微小单元称为流体质点。流体分子的平均速度对应于流体质点的速度；分子的不规则热运动对应于热力学状态。进一步可以认为，速度不同的相邻流体质点间的动量交换是由质点表面分子的碰撞引起的。假设质量同为 $m$ ，而速度分别为 $u_1$ 、 $u_2$  ( $u_1 < u_2$ ) 的两个流体质点在相邻的两层中运动，并如上所述作动量交换，则它们的速度将分别变为 $u_1 + \delta u$ 和 $u_2 - \delta u$ 。速度为 $u_1$ 的质点，其动量增加了 $m\delta u$ ，对应于这一动量增量的力是速度为 $u_2$ 的质点给它的。那么可以认为速度为 $u_2$ 的质点受到一个与之相反的力，动量减少了 $m\delta u$ 。这是因为根据力学原理，系统动量的变化率等于该系统所受的力。至于动量增加量与减少量之所以相等则是由于两个流体质点动量之和守恒的缘故。对应于流体质点动量增减量的力就是剪切力。如果把流体看作是连续体，则流体质点间的边界无论取在哪里都行，且速度梯度也是连续的。剪切力是作用在任意面上的表面力，在面的两侧大小相等、方向相反地作用着；流体的压力同样也是作用在任意面上的表面力。压力是垂直于作用面的法向力，与此相反，剪切力则如1.4节所指出的那样，与流体的变形运动有关，作用方向沿接触面。通常把每单位面积上的剪切力称为剪应力。摩擦阻力就是固体表面上剪应力的积分值。

速度分别为 $u_1$ 、 $u_2$ 的两质点，其动量和在上述那样作动量交换前后是守恒的，且为 $m(u_1 + u_2)$ 。只要分子间有非完全碰撞，就有

$u_1 + \delta u < u_2$ , 全部动能就会减少

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} m(u_1^2 + u_2^2) - \frac{1}{2} m\{(u_1 + \delta u)^2 + (u_2 - \delta u)^2\} \\ & = m\delta u\{u_2 - (u_1 + \delta u)\} > 0. \end{aligned}$$

此项减少的动能将变成分子热运动能量（热能）。在流体的动能转换为热能的不可逆过程中将产生压力损失。

通常，人们把流体质点间动量交换是通过分子热运动而进行的流动称为层流。速度梯度愈大，剪应力增加就愈显著。在层流时，速度梯度（下节将指出这无非就是剪切变形速度）与剪应力之间存在着固有的关系，而对这一关系起着重要作用的是称之为粘性系数的流体物性值。另一方面，当流速很大时，在离开固体表面某一距离处，流动将变得不稳定，宏观上质点也将开始不规则地运动，由于流体质点之间的混合，将进行动量交换。这种动量交换远比由于分子运动而引起的动量交换大得多，通常称这种流动为湍流。因此，流体的湍流度比起流体固有的粘性来，对于湍流剪应力起着更强的支配作用。关于湍流，将在第四章详细叙述，这里先研究一下流体固有的物性——粘性。

粘性流体常根据剪应力  $\tau$  ( $\text{N/m}^2, P_a$ ) 与剪切变形速度  $\gamma$  ( $1/s$ ，参看式 (1.8)) 之间的函数关系来分类。空气和水一类粘性流体，它们的  $\tau$  与  $\gamma$  之间成正比，其比例常数就是粘性系数 ( $\text{N}\cdot\text{s/m}^2, P_a\cdot\text{s}$ )。

$$\tau = \mu \gamma \quad (1.1)$$

通常，根据发现者的名字称遵循上式的流体为牛顿流体，称式 (1.1) 为牛顿粘性定律。另一方面，象聚脂等高分子溶液、粘土与水的混合物——泥浆等不遵循上式的流体则被称为非牛顿流体，对于它们，表示  $\tau$  与  $\gamma$  间函数关系的曲线叫做流变曲线。研究流体变形情况的学科叫做流变学，它是化工学的一个重要领域。本书只探讨牛顿流体的运动。

粘性系数 $\mu$ 是压力 $p$ 与温度 $T$ 的函数,若采用以它们各自的临界值 $^{1)}\mu_c$ 、 $p_c$ 、 $T_c$ 无量纲化了的换算压力 $p_r = p/p_c$ 、换算温度 $T_r = T/T_c$ ,则它们与流体换算粘性系数的各种关系就象图1.1那样,可由一张图来表示。表1.1给出了各种气体的临界值 $p_c$ 、 $T_c$ 和 $\mu_c$ 。从实用角度来看,只要压力不是特别高,就不必考虑粘性系数随压力的变化,可以认为它只是温度的函数。设 $0^\circ\text{C}$ 时的粘性系数为 $\mu_0$ ,对气体经常可采用麦克斯韦-瑞雷(Maxwell-Rayleigh)关系式

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left( \frac{T}{T_0} \right)^n \quad (1.2)$$

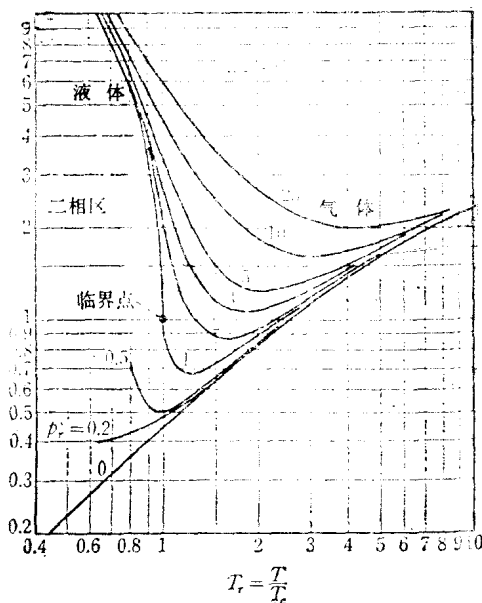


图1.1 换算粘性系数与换算温度、换算压力的关系

- 1) 在压力低于 $p_c$ 时将液体加热,在某个温度 $T_c$ 时会出现蒸发现象,由液体变为气体。通常称此压力 $p_c$ 为临界压力, $T_c$ 为临界温度。此状态下的粘性系数就是临界粘性系数 $\mu_c$ 。

表1.1 气体的临界值与关于粘性系数的指数定律式 (1.2) 和 Sutherland的式 (1.3) 的数值

| 气体的种类 | $p_c$<br>(N/m <sup>2</sup> ) | $T_c$<br>(K) | $\mu_c$<br>(N·s/m <sup>2</sup> ) | $T_0$<br>(K) (N·s/m <sup>2</sup> ) | $\mu_0$<br>(N·s/m <sup>2</sup> ) | $n$<br>式 (1.2) 的<br>适用范围 | 误差<br>(%) | S 式 (1.3) 的<br>(K) 适用范围 | 误差<br>(%) |
|-------|------------------------------|--------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------|-------------------------|-----------|
|       | ( $\times 10^6$ )            |              | ( $\times 10^{-6}$ )             |                                    | ( $\times 10^{-6}$ )             | (K)                      |           | (K)                     |           |
| 空气    | 3.78                         | 132.5        | 19.3                             | 273.2                              | 17.16                            | 0.666 210—1900           | $\pm 4$   | 111 170—1900            | $\pm 2$   |
| 氩     | 1.86                         | 150.8        | 26.4                             | 273.2                              | 21.25                            | 0.72 200—1500            | $\pm 3$   | 144 120—1500            | $\pm 2$   |
| 二氧化碳  | 7.38                         | 304.3        | 34.4                             | 273.2                              | 13.70                            | 0.79 210—1700            | $\pm 5$   | 222 190—1700            | $\pm 2$   |
| 一氧化碳  | 3.55                         | 134.2        | 19.1                             | 273.2                              | 16.57                            | 0.71 230—1500            | $\pm 2$   | 136 130—1500            | $\pm 2$   |
| 氮     | 3.29                         | 126.1        | 18.0                             | 273.2                              | 16.63                            | 0.67 220—1500            | $\pm 3$   | 107 100—1500            | $\pm 2$   |
| 氧     | 5.04                         | 155.2        | 25.0                             | 273.2                              | 19.19                            | 0.69 230—2000            | $\pm 2$   | 139 190—2000            | $\pm 2$   |
| 氪     | 1.30                         | 33.3         | 3.47                             | 273.2                              | 8.411                            | 0.63 80—1100             | $\pm 2$   | 97 200—1100             | $\pm 2$   |
| 水蒸气   | 22.1                         | 647.4        | 49.5                             | 416.7                              | 17.03                            | 1.04 280—1500            | $\pm 3$   | 861 360—1500            | $\pm 2$   |

注,  $10^6 \text{ N/m}^2 (P_a) = 1 \text{ MP}_a$  (兆帕斯卡),  $10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2 = 10^{-6} P_a \cdot \text{s} = 10^{-6} P_a \cdot \text{s}$  (微帕斯卡)。



或骚泽兰德 (Sutherland) 关系式

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \cdot \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (1.3)$$

上式中对于各种气体的 $\mu_0$ ,  $T_0$ ,  $n$ ,  $S$ 值均已列在表1.1中了。

式 (1.2) 或 (1.3) 表明气体温度越高, 粘性系数就越大。其原因是气体分子的平均自由程大, 其间的动量交换依赖于分子的热运动, 热运动随温度上升而加剧; 与此相反, 液体分子的平均自由程小, 动量交换依赖于分子互相接触的时间, 温度升高和热运动加剧, 使分子接触时间变短, 分子凝聚力变小, 从而使粘性系数变小。对于水, 经常采用下面的亥姆霍兹 (Helmholtz) 关系式

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{1}{1 + 0.03368\theta + 0.000220996\theta^2} \quad (1.4)$$

其中 $\theta$ 为摄氏温度。表 (1.2) 给出了主要液体的粘性系数 (在水的情况下包括 $\mu_0$ )。

表1.2 液体的粘性系数 ( $1.0133 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ 气压}$ )

| 液体的种类  | 温度<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 粘性系数 $\mu(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$ | 运动粘性系数 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$ |
|--------|------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 水      | 0                            | $1.783 \times 10^{-3}$                         | $1.783 \times 10^{-6}$            |
|        | 20                           | $1.002 \times 10^{-3}$                         | $1.004 \times 10^{-6}$            |
|        | 40                           | $0.651 \times 10^{-3}$                         | $0.656 \times 10^{-6}$            |
|        | 100                          | $0.283 \times 10^{-3}$                         | $0.296 \times 10^{-6}$            |
| 汽 油    | 20                           | $0.31 \times 10^{-3}$                          | $0.46 \times 10^{-6}$             |
| 轻 油    | 20                           | $2.0 \times 10^{-3}$                           | $2.4 \times 10^{-6}$              |
| 轻润滑油   | 60                           | $4.17 \times 10^{-3}$                          | $4.95 \times 10^{-6}$             |
| 甘 油    | 20                           | $14.90 \times 10^{-3}$                         | $11.30 \times 10^{-6}$            |
| 水 银    | 20                           | $1.55 \times 10^{-3}$                          | $0.115 \times 10^{-6}$            |
| 钠钾共晶合金 | 100                          | $0.546 \times 10^{-3}$                         | $0.616 \times 10^{-6}$            |

注:  $10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  (毫帕斯卡秒)。