

873633

高等学校教学用书

5822

221

# 传 热 学

任 瑛 编  
张 弘



石油大学出版社

高等学校教学用书

# 传 热 学

任 璞 张 弘 编

石油大学出版社

## 内 容 提 要

本书是根据1985年石油院校热工学科组会的决定编写的。除绪论外,共分八章:热传导的基本概念和一维热传导、热传导方程式和二维热传导、不稳定热传导、辐射换热、对流换热的理论分析、单相流体对流换热的准则方程式、凝结和沸腾换热、换热器。每章附有例题、习题。本书既注重基本理论和基本概念的阐述,又注意结合在工程技术领域中的应用,内容充实,文字流畅。书末附录中列有传热计算中常用的物性数据表,并增补了石油工业中常用的岩石、油品物性。

本书可作为高等院校的热能工程、采油、储运、化工机械、矿业机械等专业的教材,也可供有关专业工程技术人员参考。

高等学校教学用书

## 传 热 学

任 瑛 张 弘 编

石油大学出版社出版

(山东省 东营市)

山东电子工业印刷厂印刷

(淄博市周村)

序本 350×1168 1/32 印张:12.25 字数:318,300

1988年5月第1版 1988年5月第1次印刷

印数:1—5000册

ISBN 7-5636-0004-3/TB·01

定价:2.91元

## 前 言

传热学在工程技术领域有着广泛的应用，在石油工业方面亦然。从石油的开采、储运到石油的提炼，都会遇到传热问题。近年来，传热学的应用研究正在渗入到高粘度、高含蜡、高凝固点石油的开采和输送的专业领域。

本书较深入地讨论了热传导、对流换热、辐射换热及传热过程与换热器的基本理论和工程计算。此外还增加了与石油生产有关的某些传热基础理论和工程应用中所需的物性数据。书中适当加强了分析解，也介绍了数值解。由于电子计算机算法语言的单独设课，因而略去了数值解中的算法语言程序示例。

本书适用于45~70学时课程安排，教师可根据教学计划中所安排的学时数适当选择基本内容和加深内容，它们已在目录中用·号表示出来，以供教师参考。

本课程宜排在第五或第六学期，在同学们掌握了高等数学、线性代数、计算方法、流体力学、工程热力学和算法语言之后进行。如用于自学，亦宜大体上遵循这一次序。

本书的绪论和前四章由任瑛教授编写，后四章由张弘副教授编写，都是在历年来所编写的讲义及各自的讲稿基础上经过整理、增补写成的。在编写过程中承山东工业大学俞佐平教授热心指导，并亲自详加审阅。在编写中还承各石油院校热工教研室的同志们和本教研室的同志们对本书提出过许多宝贵意见，在此仅向他们致以衷心的感谢，限于编者的水平及编写时间短促，恳切希望使用本书的同志们对书中的错误和不当之处提出批评、指正。

编 者

1987年10月

## 主 要 符 号 表

|           |             |
|-----------|-------------|
| $a$       | 热扩散系数(导温系数) |
| $c$       | 比热          |
| $C$       | 热容量         |
| $E$       | 辐射力         |
| $F$       | 面积          |
| $g$       | 重力加速度       |
| $I$       | 定向辐射强度      |
| $K$       | 传热系数        |
| $L, l$    | 长度          |
| $N$       | 功率          |
| $p$       | 压力(压强)      |
| $q$       | 热流密度        |
| $\dot{q}$ | 内热源强度       |
| $Q$       | 热流量         |
| $R$       | 热阻          |
| $t$       | 温度          |
| $T$       | 热力学温度(绝对温度) |
| $U$       | 周长          |
| $V$       | 容积、体积       |
| $u, v, w$ | 速度          |
| $x$       | 千度          |
| $X$       | 视角系数(角系数)   |

- $\alpha$  换热系数, 吸收率
- $\beta$  体膨胀系数
- $\delta$  厚度
- $\varepsilon$  辐射率(黑度), 换热器的有效度
- $\theta$  过剩温度
- $\Theta$  无量纲过剩温度
- $\lambda$  热传导系数, 波长
- $\mu$  动力粘度
- $\nu$  运动粘度
- $\rho$  密度, 反射率(反射系数)
- $\sigma$  表面张力
- $\sigma_0$  黑体辐射常数(斯蒂芬-玻尔菲曼常数)
- $\tau$  时间, 透过率(透过系数)
- $\omega$  立体角
- $\eta$  效率

# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 主要符号表                      | I   |
| 绪 论                        | 1   |
| 第一章 热传导的基本概念和一维稳定热传导       | 12  |
| 第一节 热传导的基本概念               | 12  |
| 第二节 傅立叶定律                  | 13  |
| 第三节 通过平壁的稳定热传导             | 15  |
| 第四节 通过圆筒壁的稳定热传导            | 17  |
| 第五节 临界保温层厚度                | 21  |
| * 第六节 通过肋片的热传导             | 23  |
| 第七节 接触热阻                   | 30  |
| 第二章 热传导方程式和二维稳定热传导         | 36  |
| 第一节 热传导方程式                 | 36  |
| * 第二节 二维稳定热传导的分析解法         | 48  |
| * 第三节 稳定热传导的热源法            | 54  |
| 第四节 二维稳定热传导的数值解法           | 60  |
| 第三章 不稳定热传导                 | 74  |
| 第一节 不稳定热传导的概念              | 74  |
| 第二节 集总热容系统                 | 76  |
| * 第三节 复合集总热容系统             | 79  |
| * 第四节 一维不稳定热传导—无限大平板的冷却或加热 | 81  |
| * 第五节 二维、三维不稳定热传导          | 98  |
| * 第六节 不稳定热传导的热源解法          | 102 |
| * 第七节 不稳定热传导的数值解法          | 108 |
| 第四章 辐射换热                   | 121 |
| 第一节 热辐射的基本概念               | 121 |

注:打\*号者为加深内容,打\*\*号者为参考内容,无\*者为基本内容。

|            |                               |            |
|------------|-------------------------------|------------|
| 第二节        | 辐射的特征                         | 122        |
| 第三节        | 黑体辐射                          | 124        |
| 第四节        | 实际固体和液体的辐射, 克希荷夫定律            | 135        |
| 第五节        | 黑体间的辐射换热及辐射形状系数               | 140        |
| 第六节        | 灰体间的辐射换热                      | 149        |
| • 第七节      | 气体辐射                          | 160        |
| • 第八节      | 太阳辐射                          | 171        |
| <b>第五章</b> | <b>对流换热的理论分析</b>              | <b>185</b> |
| 第一节        | 对流换热过程                        | 185        |
| 第二节        | 边界层与对流换热系数                    | 187        |
| 第三节        | 确定对流换热系数的方法                   | 197        |
| 第四节        | 层流边界层对流换热的数学描述                | 198        |
| • 第五节      | 纵掠平板层流边界层类型对流换热的积分<br>方程组及其求解 | 205        |
| • 第六节      | 管内层流换热                        | 220        |
| 第七节        | 动量传递与热量传递的比拟                  | 227        |
| • 第八节      | 流体沿竖板自然对流的层流换热                | 236        |
| <b>第六章</b> | <b>单相流体对流换热的经验公式</b>          | <b>245</b> |
| 第一节        | 对流换热微分方程组的无量纲化及相似概念           | 246        |
| 第二节        | 管内强制对流换热                      | 258        |
| 第三节        | 横掠圆管流动换热                      | 268        |
| 第四节        | 流体自然对流时的换热                    | 277        |
| • 第五节      | 兼有自然对流和强制对流的换热                | 287        |
| 第六节        | 总换热系数                         | 289        |
| <b>第七章</b> | <b>凝结和沸腾换热</b>                | <b>292</b> |
| 第一节        | 凝结换热                          | 292        |
| 第二节        | 沸腾换热                          | 301        |
| <b>第八章</b> | <b>换热器</b>                    | <b>310</b> |
| 第一节        | 间壁式换热器的类型                     | 311        |
| 第二节        | 传热系数                          | 313        |
| 第三节        | 换热器分析与传热计算                    | 317        |



|                  |                                                                             |     |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| • 第四节            | 传热系数变物性的分析 .....                                                            | 337 |
| 第五节              | 传热的强化 .....                                                                 | 338 |
| • • 第六节          | 热管 .....                                                                    | 339 |
| <b>附 录</b> ..... |                                                                             |     |
| 附录1              | 金属材料的密度、比热和热传导系数 .....                                                      | 345 |
| 附录2              | 保温、建筑及其他材料的密度和热传导系数 .....                                                   | 348 |
| 附录3              | 几种保温、耐火材料的热传导系数与温度的关系 .....                                                 | 349 |
| 附录4              | 饱和流体的岩石体积热容 .....                                                           | 350 |
| 附录5              | 饱和流体的岩石物性 .....                                                             | 350 |
| 附录6              | 岩石试样的描述 .....                                                               | 351 |
| 附录7              | 各种表面的法向全辐射率 .....                                                           | 351 |
| 附录8              | 饱和水的热物理性质 .....                                                             | 354 |
| 附录9              | 干饱和水蒸气的热物理性质 .....                                                          | 356 |
| 附录10             | 几种饱和液体的热物理性质 .....                                                          | 358 |
| 附录11             | 几种油类热物理性质 .....                                                             | 360 |
| 附录12             | 干空气的热物理性质<br>( $p = 760 \text{ mmHg} = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) ..... | 361 |
| 附录13             | 在大气压力( $p = 760 \text{ mmHg}$ )下烟气的热物理性质 .....                              | 362 |
| 附录14             | 甲烷(天然气的主要成分)的热物理性质, 在不同压力、<br>温度下的比热 .....                                  | 363 |
| 附录15             | 石油及石油产品的性质 .....                                                            | 364 |
| 附录16             | 油罐及管道常用传热系数K的参考值 .....                                                      | 371 |
| 附录17             | 气体(碳氢化合物)在1个大气压下的动力粘度线图 .....                                               | 372 |
| 附录18             | 甲烷乙烷在表压0-1个大气压下的比热线图 .....                                                  | 373 |
| 附录19             | 气体(碳气化合物)在1个大气压(表压)下热传导系数<br>与温度的关系图(M为分子量) .....                           | 374 |
| 附录20             | 指数积分函数表 .....                                                               | 375 |

# 绪 论

## 一、传热学在生产发展中的意义

传热学是本世纪以来随着工业生产发展起来的一门学科，它主要研究热量传递的机理及其在工业生产上的应用。例如：工业锅炉、加热炉、换热器等设备的设计及其能力和技术经济指标的分析；燃气轮机叶片和燃烧室壁能否长期在高温条件下运行；工业和民用建筑中制冷、采暖通风和空气调节；冶金及机械制造中金属材料的热处理以及余热利用和节能技术等诸方面；无一不涉及传热学的知识。石油工业中，特别是高粘度石油和高含蜡、高凝固点石油的开采、集输、储运和精炼等方面，同样存在着大量的传热学课题。

工业生产对传热学应用的要求，大体上可分为两种类型：一类是设法提高传热速率以求得换热设备材料节省、体积缩小、或者降低传热速率以求得热量散失的减少；另一类则着重于确定温度分布以便于对某种生产工艺中，某些特定位置上温度极限的控制。显然，在工业生产中，这两方面都具有重要意义。

## 二、传热学的研究方法

传热是由于温差引起的热量传递过程。热量总是自发地由较高温度的物体传至较低温度的物体。传热的结果，热物体温度降低而冷物体温度升高，最后达到平衡。如要维持某部分的温度高于另一部分的温度，就必须不断地从外界向温度较高的部分补充

传走的热量，并从温度较低的部分取走所传来的热量。

在发生传热的同时，有时也发生能量形式上的转化。如化学反应总伴随着吸热或放热、电流通过导线时的发热、高温物体的热辐射、高速气流对固体表面的摩擦生热等。研究热能和其他形式的能量之间互相转化规律的学科是热力学。传热学必然要遵守热力学的规律(热力学第一定律和第二定律)。热力学第一定律所阐明的运动不灭、能量守恒和转化的自然法则，传热学是决不能违背的；热力学第二定律指出的自然界的过程总是有条件进行的：热量总是自发地从温度较高处传往温度较低处；这是一个典型的不可逆过程。而传热学恰恰对这个不可逆过程中的传热的快慢程度进行了定量的分析和计算。传热学和工程热力学、传质学、气体动力学、燃烧学等共同构成工程热物理这门科学。

传热学的研究，大体上可分为理论分析计算和试验研究两个方面，二者是相辅相成的。理论分析计算，主要是解析法，也就是，根据物理现象和热力学第一定律的原则，写出微分方程组、初始及边界条件，然后求解。由于过程的复杂性和求解时数学上的困难，在工程上，允许作适当的简化和理想化，即舍弃某些次要的方面，作出近似化的处理。例如运用“数量级”分析的方法。又如将热物性参数取为常数、忽略固体的膨胀功和把气体看作连续介质等等都是这种简化和理想化的例子。近年来，电子计算机程序计算的发展，使得一些复杂形状物体、强烈非线性的、用纯解析法难以求解的传热问题，可以利用数值方法求解。在石油工业中，涉及传热学的数值模拟正在广泛地得到应用。

试验研究主要有两个方面，一是传热计算中所用到的各种材料和流体热物性的测定以及计算公式中某些常数的测定，这是非常重要的基础工作，在这一方面已经积累了许多资料，而且还在不断地向空白的领域发展。另一方面就是具体传热问题的物理模拟，它对解析计算、分析和数值模拟起着验证、定标、补充的作用。对于一些正在探索的领域，是非常必要的。

### 三、热量传递的基本方式

热量传递有三种方式，即：热传导、热对流和热辐射。

#### 1. 热传导

热传导是依靠分子运动而进行的一种热量传递现象。气体的热传导是分子不规则运动时碰撞的结果。温度较高的气体具有较大的分子运动动能，而温度较低的气体，分子所具有的动能也较低。当动能较大的分子碰撞动能较小的分子时，就传给它一部分动能。结果，热量就由温度较高处传到了温度较低处。金属等导电体中有相当多的自由电子，因此，金属等导电体中的热传导主要依靠自由电子的运动来完成。非导电的固体中的热传导是通过晶格结构的振动，即分子、原子在其平衡位置附近的振动来实现的。晶格振动的传递，通常称为弹性波。至于液体热传导的机理，一种观点认为同气体类似，但情况更复杂些；另一种观点认为主要靠弹性波的作用。目前，两种观点并存，而弹性波观点略占优势。

傅立叶(J. B. J. Fourier, 1768—1830)运用数学物理方法

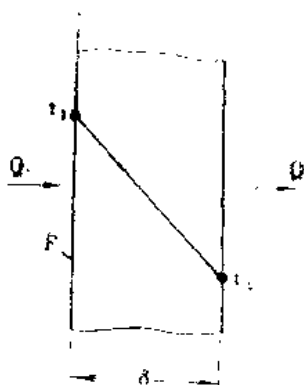


图1 通过大平板的热传导

导出单位时间内由热传导通过如图1所示平板的热量公式:

$$Q = \lambda F \frac{t_1 - t_2}{\delta} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda F}} = \frac{\Delta t}{R_\delta} \text{ W} \quad (1)$$

单位面积上的热流称为热流密度, 即

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{\Delta T}{R'_\delta} \text{ W/m}^2 \quad (2)$$

式中  $R_\delta = \frac{\delta}{\lambda F}$  ——导热截面为  $F$  时的导热热阻  $^\circ\text{C/W}$ ;

$R'_\delta = \frac{\delta}{\lambda}$  ——单位面积上的导热热阻  $\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$

这样, 就得到了一个类似于电学上欧姆定律的公式, 它对于热传导的计算有很大用处。

式(1)、(2)中, 比例系数  $\lambda$  称为热传导系数或导热系数。从公式(2)看出: 当  $t_1 - t_2 = 1^\circ\text{C}$ ,  $\delta = 1\text{m}$ , 热传导系数在数值上等于热流密度。热传导系数反映了材料的导热能力, 是材料的一种物性, 它通常是通过实验测定取得的。



图2 邻近壁面处流体温度的分布

## 2. 热对流

热对流是指流体中温度不同的各部分之间相互掺混的宏观运动引起的热量传递过程。热对流仅发生在流体中, 而且伴随着热传导现象。对流换热是指和壁面相接触的流体与壁面之间的换热, 它是依靠

热对流和流体的热传导相结合进行的。流体流过壁面时流体中的温度分布如图 2 所示。对流换热是一个受许多因素影响的复杂过程。1701 年牛顿(I. Newton)把对流换热计算简化为:

$$Q_c = \alpha_c F (t_w - t_f) = \frac{t_w - t_f}{\frac{1}{\alpha_c F}} = \frac{t_w - t_f}{R_c} \quad W \quad (3)$$

或写为

$$q_c = \frac{Q_c}{F} = \frac{t_w - t_f}{\frac{1}{\alpha_c}} = \frac{t_w - t_f}{R_c} \quad W/m^2 \quad (4)$$

式中  $R_c = \frac{1}{\alpha_c F}$  ——换热壁面  $F$  的对流热阻,  $^{\circ}C/W$ ;

$R_c' = \frac{1}{\alpha_c}$  ——单位面积上的对流热阻,  $(m^2 \cdot ^{\circ}C)/W$ 。

从式(4)可看出, 当  $t_w - t_f = 1^{\circ}C$  时,  $\alpha_c = q$ ,  $\alpha_c$  称为对流换热系数或对流放热系数, 即当  $t_w$  与  $t_f$  相差  $1^{\circ}C$  时, 对流换热系数在数值上等于热流密度。

### 3. 热辐射

只要物体的温度高于绝对零度, 它就能以发射电磁波的形式发射出能量。温度越高, 发射出的能量也越多。这种由于温度的原因所导致的能量辐射称为热辐射。

热辐射的特点:

(1) 辐射能可以在真空中传播, 无需通过中间介质;

(2) 在热辐射过程中, 不但有能量的转移, 而且有能量形式上的转化。首先, 物体的一部分内能转化为电磁波辐射能发射出去, 当此电磁波投射到另一物体上而被吸收时, 电磁波辐射能又转化为物体的内能;

(3) 物体在发射辐射能时, 也在不断地吸收其他物体投射于其表面的辐射能。故两个物体间的辐射换热, 实际上是顺向与逆

向辐射能传递之差。若两物体温度相等，则说明彼此辐射的与所吸收的辐射能相等，而处于一种动态平衡。

1884年，玻尔兹曼 (L. Boltzmann) 用热力学方法证明了黑体的辐射力，即每平方米表面积每秒钟发射的能量为

$$E_b = \sigma_b T^4 \text{ W/m}^2 \quad (5)$$

式中  $T$  ——黑体的绝对温度，K；

$\sigma_b$  ——斯蒂芬-玻尔兹曼常数，

$$\sigma_0 = 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

黑体是一种理想的物体，在同样的温度下，它具有最大的辐射力。非黑体的辐射力  $E$  低于黑体的辐射力  $E_b$ ，为

$$E = \varepsilon \sigma_b T^4 \text{ W/m}^2 \quad (6)$$

式中  $\varepsilon$  称为辐射率 (Emissivity) 或黑度 (Blackness)，它通常是一个小于1的数。对于黑体  $\varepsilon = 1$ 。

两物体间的辐射换热按下式计算

$$Q_{1,2} = \varepsilon_{1,2} F_1 \sigma_b (T_1^4 - T_2^4) \quad (7)$$

式中： $T_1$  及  $T_2$  分别为物体1及2的表面绝对温度； $\varepsilon_{1,2}$  是系统的综合黑度，它不但与两个物体表面本身的黑度  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  有关，而且还与两个物体的辐射表面积  $F_1$ 、 $F_2$  及其彼此间的视角系数有关。 $F_1$ 、 $F_2$  分别为物体1、2的表面积  $\text{m}^2$ 。

如果参与辐射换热的只是由温度为  $T_f$  K 的透明气体隔开的物体表面1与2，而不涉及第三者，则  $Q_{1,2}$  显然是从表面1传出的净辐射热流量，同时也是传给表面2的净辐射热流量，如果记为  $Q_r$ ，并表示为公式(3)的形式，即

$$Q_r = a_r F_1 (T_1 - T_f) \text{ W} \quad (8)$$

$$\text{或} \quad q_r = \frac{Q_r}{F_1} = a_r (T_1 - T_f) \text{ W/m}^2 \quad (9)$$

因  $Q_r = Q_{1,2}$ ，把公式(7)代入后，可得

$$a_r = \frac{\varepsilon_{1,2} \sigma_b (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_f} \quad (10)$$

式中  $\alpha_r$  称为辐射换热系数, 其单位为  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。考虑到表面 1 与气体间还有对流换热, 则表面 1 的总换热量为

$$\begin{aligned} Q &= Q_c + Q_r = \alpha_c(T_1 - T_f)F_1 + \alpha_r(T_1 - T_f)F_1 \\ &= (\alpha_c + \alpha_r)F_1(T_1 - T_f) = \alpha F_1(T_1 - T_f) \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $\alpha = \alpha_c + \alpha_r$ , 称为总换热系数。

## 四、传 热

工程上常用的换热器、锅炉、加热炉中的热量传递过程多指由壁一侧的高温流体通过金属壁传热到另一侧的低温流体的换热过程, 它往往包括热传导、对流换热及辐射换热三种热量传递的方式, 称为复杂传热或简称传热。图 3 表示通过平壁的传热, 其传热量为

$$Q = KF(t_{f1} - t_{f2}) \quad (12)$$

式中  $K$  称为传热系数, 按下式计算

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \\ &W/(m^2 \cdot ^\circ C) \end{aligned} \quad (13)$$

式(12)又可写为

$$q = \frac{Q}{F} = K(t_{f1} - t_{f2}) \quad (14)$$

很明显, 当  $t_{f1} - t_{f2} = 1^\circ C$  时,  $K = q$ , 即: 当壁两侧的

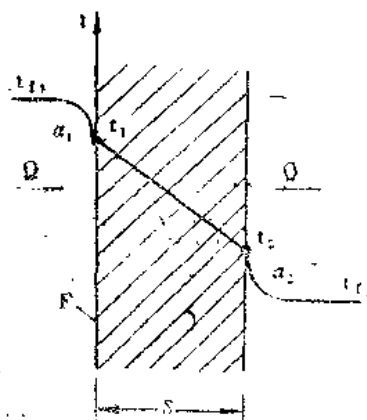


图3 通过平壁的传热

的流体温度相差  $1^\circ C$  时, 传热系数在数值上等于热流密度。若壁两侧流体均为气体, 则式(13)中,  $\alpha_1 = \alpha_{1c} + \alpha_{1r}$ ,  $\alpha_2 = \alpha_{2c} + \alpha_{2r}$ , 因而, 传热系数是综合了流体与壁面间的对流和辐射换热热阻及通过壁的导热热阻的一个总指标, 故又称为总传热系数。由此可



见, 传热学虽然按其规律特点的不同, 以热传导、热对流、热辐射三种方式分别研究它们的规律, 但通过总传热系数又综合到一起来了, 因为这三种不同的传热方式, 经常是同时发生的。

## 五、单 位 制

本书采用国际单位制(SI), 涉及传热学的基本单位是

长度——米,  $m$ ;

质量——公斤,  $kg$ ;

时间——秒,  $s$ ;

温度——开尔文,  $K$ 。

在传热学中, 凡涉及温度差的地方, 都用 $^{\circ}C$ 作为温度单位, 因为 $1^{\circ}C$ 与 $1 K$ 是相等的。除基本单位外, 还用到下列导出单位:

力——牛顿,  $N(m \cdot kg/s^2)$ ;

压力——帕斯卡,  $Pa(N/m^2)$ ;

能量、热量、功——焦耳,  $J(N \cdot m)$ ;

功率——瓦,  $W$ , ( $1W = 1J/s$ );

比热——千焦/(公斤 $^{\circ}C$ )  $KJ/(kg \cdot ^{\circ}C)$ ;

热传导系数——瓦/(米 $^{\circ}C$ )  $W/(m \cdot K)$ ;

热扩散系数(导温系数)——米<sup>2</sup>/秒,  $m^2/s$ ;

动力粘度——帕斯卡·秒,  $PaS$ ; 或千克/(米·秒),  $kg/(m \cdot s)$

运动粘度——米<sup>2</sup>/秒,  $m^2/s$ ;

表面张力——牛顿/米,  $N/m$ 。

我国现已法定采用 SI 制, 但在许多厂矿仍处于从工程单位制向 SI 制过渡阶段。为便于读者参阅文献资料, 兹列一单位换算表, (表1), 以备查用。