

204

工程传热学

ENGINEERING

HEAT TRANSFER

[美] J. R. 威尔蒂 著

任泽霖 罗棣庵 等译



人民教育出版社

✓

工 程 传 热 学

书
[美] J. R. 威尔蒂 著
任泽霈 罗棣庵 等译

人 民 教 育 出 版 社

内 容 简 介

本书是根据美国俄勒冈州立大学 (Oregon State University) 威尔蒂 (J. R. Welty) 教授所著《工程传热学》(Engineering Heat Transfer) 1978 年版译出的。原书是美国高等院校的传热学教科书。

全书共七章: 传热学的基本概念、传热方程式、传热方程式的数值表达式、导热、对流换热、辐射换热和换热设备。书末附有习题和附录。书中重点放在基本概念的阐述和求解问题的方法上。本书的特点是专设一章讲述传热问题的数值方法, 并在导热及辐射换热等章中给出了若干例题的数值解, 包括流程图、Fortran 程序及计算机计算结果。

本书可作为动力类专业的教学参考书, 也可供有关科技人员参考。

工程传热学

[美] J. R. 威尔蒂 著

任泽霈 罗棣庵 等译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 15.5 字数 375,000

1982年4月第1版 1983年6月第1次印刷

印数 00,001-10,000

书号 15012·0403

定价 2.00 元

译者序

本书是根据美国俄勒冈州立大学(Oregon State University)威尔蒂(J. R. Welty)教授所著的《工程传热学》(Engineering Heat Transfer) 1978年版译出的。原书是美国高等院校的传热学教科书, 1975年以英制版本问世, 1978年版改用国际单位制。

书中重点放在基本概念的阐述和求解问题的方法上, 这对于读者深入具体地了解传热过程是十分有益的。

目前, 大学生以及工程技术人员都在使用计算机解决传热问题, 因此作者有意识地系统地增加了数值分析方法的内容, 结合基本原理的阐述, 在书中给出了若干问题的数值解, 包括流程图、FORTRAN 程序示例和计算机输出。在经典分析方法之外补充了计算机解题程序, 从而扩展了书稿内容的深度和广度, 是本书相对于其他教科书的明显特点。

传热学的实验研究方法是很重要的, 因此, 作者对因次分析也给予了应有的注意, 并介绍了对流换热的经验公式。

书中在辐射换热的论述中采用了广泛应用的辐射网络法; 在换热器的分析中使用了对数平均温差法和效率-传热单元数法, 这两种方法各有其优点, 在工程实践中均被采用。

本书由清华大学热能工程系任泽霈(第四章、附录及习题)、罗棣庵(第五章)、林兆庄(第三章)、焦芝林(第七章)、孟桂荣和张立宁(第六章)、邓小雪(第二章)和李桂馥(第一章及习题)共同翻译, 任泽霈同志最后通读校阅了全书的译稿。由于时间仓促, 译者水平有限, 译文中难免还有不少错误之处, 热诚欢迎批评指正。

译者

一九八一年十二月

前 言

近二十年来，出版了许多与传热学科有关的教科书。每一次作者们都深信，他们的新作给在这个重要领域学习的大学生提供了某些新的和独特的材料。在这个时期，传热学本身也取得了很大的进展，提出并发表了许多传热学方面的新见解和解题的新方法。

每一个大学教师在他们的教学工作中都得出了最好的讲授某些内容的方法和组织这些内容的途径。本教科书提供了作者在十五年间使用过的几个不同方法中最好的论述方法和编排次序。

可以相信，完成初等或中等水平的传热学课程学习的大学生应该了解所涉及的物理现象，并具有用数学公式表达和解决传热学领域中所遇到的典型问题的能力。对物理现象的基本了解和求解问题是本教科书的重点。

本教科书着重于传热学的基本方面，不打算详尽地论述这个领域的进展和最新研究。传热分析的现代应用是很多的。原子能、电子学、航空和航天工业促使传热领域有了很大发展；在许多环境工程的应用中，传热学是极其重要的；热管有可能是过去半个世纪中最重要的技术发展之一。深入这些应用领域的任何作者都难以知道何时可止，考虑到陷入困境的可能性，作者决定不涉及这一问题。本教科书中介绍的基本概念和对讨论过的解题方法的理解以及使用能力一起为工程师提供了充分的知识和足够的工具，以便研究新的有时是复杂的分析领域。

本教科书包含一整章关于传热问题的数值解法。所阐述的数

值计算和应用数值方法求解传热问题也许是本教科书相对于其他已出版的教科书的最明显的特点。书中给出了一些适宜于数值方法求解的问题的数值解，其中包括流程图、FORTRAN 程序示例和计算机输出。数字计算机正被广泛地应用于求解以前手算解决的问题。传统上包括在传热学教科书中的冗长复杂的解，在本教科书中被省略了。松弛法就是这种省略的一例，它变为数值分析的一般的应用。在个别的课程中，尽管一些例题用数值方法求解，但是数值表达式这一章可能被省略了，然而这些方法在工程师的工作中必定会用到。本书中的数值程序的介绍是想要得出一个汇编以及培养工程师编制简单的程序，并具有与编制或使用较高级程序的人员交谈的足够能力。

数值解法应用于导热问题是最容易的。大部分数值求解的例题包含在完全叙述导热的第四章中；在涉及辐射的第六章中，求解了一个例题；对流换热的问题没有用数值求解。这样明显的不平衡的处理方式的原因在于，在对流换热的情形下求解现实问题所必须的数学表述和计算机程序的复杂性。数值解正被用于对流换热领域中，并且是十分重要的，但是这样的解已超出了本教科书的范围。

任何教科书的写作都需要选择材料和对论述的深浅作出合理的综合考虑。作者认为，本教科书的选择是最适当的。应用本教科书的大学生应具有运用微分方程的数学能力。热力学的某些基础知识和流体力学中的基本概念都将是十分有帮助的，在论述对流换热的第五章的前面部分提供了一些流体流动的内容。

在准备编写这本教科书时，许多人向作者提供了帮助。在选定适当的材料方面和阐述某些章节的最佳方法方面，与同事们和研究生们的交谈对形成主见是有帮助的。对于 D. S. 特林特(Donald S. Trent)博士和 D. P. 斯赖克(David P. Slack)先生的帮助和他

们对于数值分析的意见表示衷心的感谢。

对于我的妻子珍妮特和我的孩子玛克、斯蒂芬、达娜、齐姆和特拉西在我写作的过程中给予我的鼓励以及他们表现出的良好品质,表示特别的感谢。

最后,感谢约翰·威利父子公司编辑部的全体人员,特别感谢 A. 拜克特(A. Beckett)先生、G. 达文普特(G. Davonport)先生和 G. 布拉姆斯(G. Brahms)先生对我的支持和一贯的信任。

科芬利斯, 俄勒冈 J. R. 威尔蒂

目 录

第一章 传热学的基本概念	1
1.1 导热	1
1.2 对流	10
1.3 热辐射	13
1.4 复合传热过程	14
1.5 小结	17
第二章 传热方程式	19
2.1 传热分析的基本定律	19
2.1-1 基本定律的集总表达式	20
2.1-2 基本定律的积分表达式	24
2.1-3 基本定律的微分表达式	28
2.2 小结	36
第三章 传热方程式的数值表达式	38
3.1 数值表达式的基本原理	38
3.1-1 导数的有限差分表达式	40
3.1-2 用差分方法导得差分方程表达式	42
3.1-3 用热平衡方法导得差分方程表达式	45
3.2 数值问题的计算方法	50
3.2-1 高斯消去法	51
3.2-2 高斯-赛德尔迭代法	56
3.3 数值求解的补充考虑	61
3.3-1 数值解的误差	62
3.4 小结	65
第四章 导热	66
4.1 稳态导热	66
4.1-1 没有热源的一维系统	67

4.1-2	具有内热源的一维稳态导热	74
4.1-3	扩展面的传热	77
4.1-4	二维和三维稳态导热	85
4.2	不稳态导热	111
4.2-1	无内热源一维系统的瞬态导热	112
4.2-2	二维和三维的瞬态导热	124
4.2-3	半无限大壁的一维瞬态导热	130
4.2-4	瞬态导热 数值分析和图解分析	137
4.3	小结	171
第五章	对流换热	172
5.1	对流换热的基本概念	172
5.1-1	流体流动的研究	172
5.1-2	流体流动—能量的综合研究	201
5.2	自然对流 理论的和实验的研究	235
5.2-1	在竖直平壁附近的流体中的对流	235
5.2-2	在竖直通道内的自然对流	240
5.2-3	水平壁面的自然对流	245
5.2-4	空气中自然对流的简化表达式	250
5.3	受迫对流 理论的和实验的研究	253
5.3-1	内部流动的受迫对流	253
5.3-2	外部流动的受迫对流	263
5.4	具有相变时的换热	273
5.4-1	沸腾换热	273
5.4-2	蒸汽凝结时的换热	280
5.5	小结	288
第六章	辐射换热	290
6.1	理想(黑体)表面的辐射	290
6.1-1	黑体的辐射强度	293
6.1-2	黑体的辐射力	294
6.1-3	黑体表面的半球单色辐射力	295
6.1-4	黑体辐射力的频谱分布 普朗克定律	296
6.1-5	黑体的总辐射强度和辐射力	298
6.1-6	在某一波段内的黑体辐射力	299

6.2	非黑体表面的辐射	301
6.2-1	辐射率	301
6.2-2	吸收率	305
6.2-3	反射率	310
6.3	实际表面的辐射特性	312
6.3-1	辐射随方向的变化	312
6.3-2	表面辐射随波长的变化	314
6.3-3	辐射随表面温度的变化	315
6.3-4	表面粗糙度的影响	315
6.3-5	表面不纯度的影响	316
6.3-6	实际表面的一般特性	317
6.4	黑体等温面之间的辐射换热	317
6.4-1	微元面积之间的辐射换热	318
6.4-2	有限面积之间的辐射换热	322
6.4-3	角系数代数	324
6.4-4	特殊相对性	333
6.4-5	延伸面角系数的确定 霍特尔交叉线法	335
6.4-6	黑体表面之间的辐射换热 电网络模拟	338
6.4-7	具有绝热再辐射表面时黑体表面之间的辐射换热	339
6.5	等温灰体表面之间的辐射换热	340
6.5-1	有效辐射与投射辐射	340
6.5-2	平行的无限大等温灰体表面之间的辐射换热	342
6.5-3	有限大的等温灰体表面之间的辐射换热	344
6.5-4	等温灰体表面之间的辐射换热 电模拟方法	345
6.5-5	灰体表面之间的辐射换热 数值解	352
6.6	有吸收和再辐射的气体存在时的辐射能量交换	364
6.6-1	通过气体层的单色吸收和透射	366
6.6-2	认为 H_2O 和 CO_2 是灰体气体的近似	366
6.6-3	吸收性气体与黑体表面之间的辐射换热	370
6.7	辐射传热系数	372
6.8	小结	372
第七章	换热设备	374
7.1	换热器的分类	375
7.2	单流程换热器的分析	378

7.2-1 单流程套管逆流换热器的分析	379
7.3 管壳式叉流换热器的分析	385
7.4 换热器设计和分析的传热单元数(NTU)法	390
7.4-1 换热器效率	391
7.5 换热器分析和设计的补充讨论	399
7.5-1 换热器的污垢	399
7.6 小结	401
附录 A 材料的性质	403
A-1 固体的物理性质	403
A-2 液体的物理性质	405
A-3 气体的物理性质	411
附录 B 瞬态导热问题解的线图	415
附录 C 误差函数	428
附录 D 各种表面的法向总辐射率	429
附录 E 普朗克辐射函数	433
习题	437

第一章 传热学的基本概念

在这一章中将介绍传热的几种方式，以及确定每种传热方式传热量的基本数量关系。

可以用最简单的形式表示传热量，它等于推动力和热导的乘积。每一种传热方式的推动力和热导(热阻的倒数)是不同的，在下节里将详细地讨论这些量。

在第一章中，还要介绍与传热学科目有关的某些术语。这些术语和符号在以后各章中一直使用，因此，首先弄清这些基本概念和术语是非常必要的。

现在就较详细地研究导热、对流和辐射这些传热方式。

1.1 导 热

导热的机理有两种。第一种是分子间的相互作用，根据这一点，处在较高能级的分子(通过它们的温度来说明)把能量传递给邻近的处在较低能级的分子。这一类传热发生在有固体、液体或气体组成，且有温度梯度存在的系统中。

第二种导热的机理借助于主要存在于纯金属固体中的自由电子实现。金属合金中自由电子的密度差别很大，而非金属中自由电子的密度则是很低的。固体的导热能力直接随自由电子的密度而变化，因此，可以预料到纯金属是最好的导热体，且经验已经证明了这一点。

导热基本上是一种需要温度梯度作为推动力的分子现象。关于这一点，我们已经提到过。温度梯度，导热介质的性质和传热量

这三者之间的关系式是傅里叶¹的贡献，他于1822年提出了关系式：

$$\frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (1-1)$$

式中 q_x 是 x 方向的热流量，单位是 W； A 是垂直于热流方向的面积，单位是 m^2 ； dT/dx 是 x 方向的温度梯度，单位是 K/m； k 是导热系数，单位是 $W/(m \cdot K)$ ；比值 q_x/A 称为 x 方向的热流通量，单位是 W/m^2 。热流通量的完整表达式是

$$\frac{\mathbf{q}}{A} = -k \nabla T \quad (1-2)$$

式中 \mathbf{q} 是热流向量，而 ∇T 是温度梯度的向量形式。考虑到导热热流发生在温度梯度降低的方向这一事实，式(1-1)和式(1-2)中的负号是必要的。这两个公式分别是傅里叶热流量方程式的标量形式和向量形式，有时称为傅里叶导热第一定律。

根据傅里叶热流量方程式，热流通量和温度梯度成正比，比例系数 k 叫做导热系数。导热系数是给定物质的一种性质，而式(1-1)和(1-2)则是导热系数的定义式。

导热系数是物质的非常重要的性质。导热系数的值在很大程度上确定了物质对特定应用场合的适用性。

图 1.1 示出了几种常用材料的导热系数的数值。在图中可以看出导热系数随温度而变化的关系，据此，我们可以得出某些一般性的结论。

对于气体，导热系数的数值随温度的增加而增加。这是由于温度升高时气体分子的扰动增加，结果使气体分子间的接触次数增加，而且分子交换速率也随之增加。

1. J. B. J. Fourier, "Théorie Analytique de la Chaleur," Gouthier-Villars, 1822; English translation by Freeman, Cambridge, 1878.

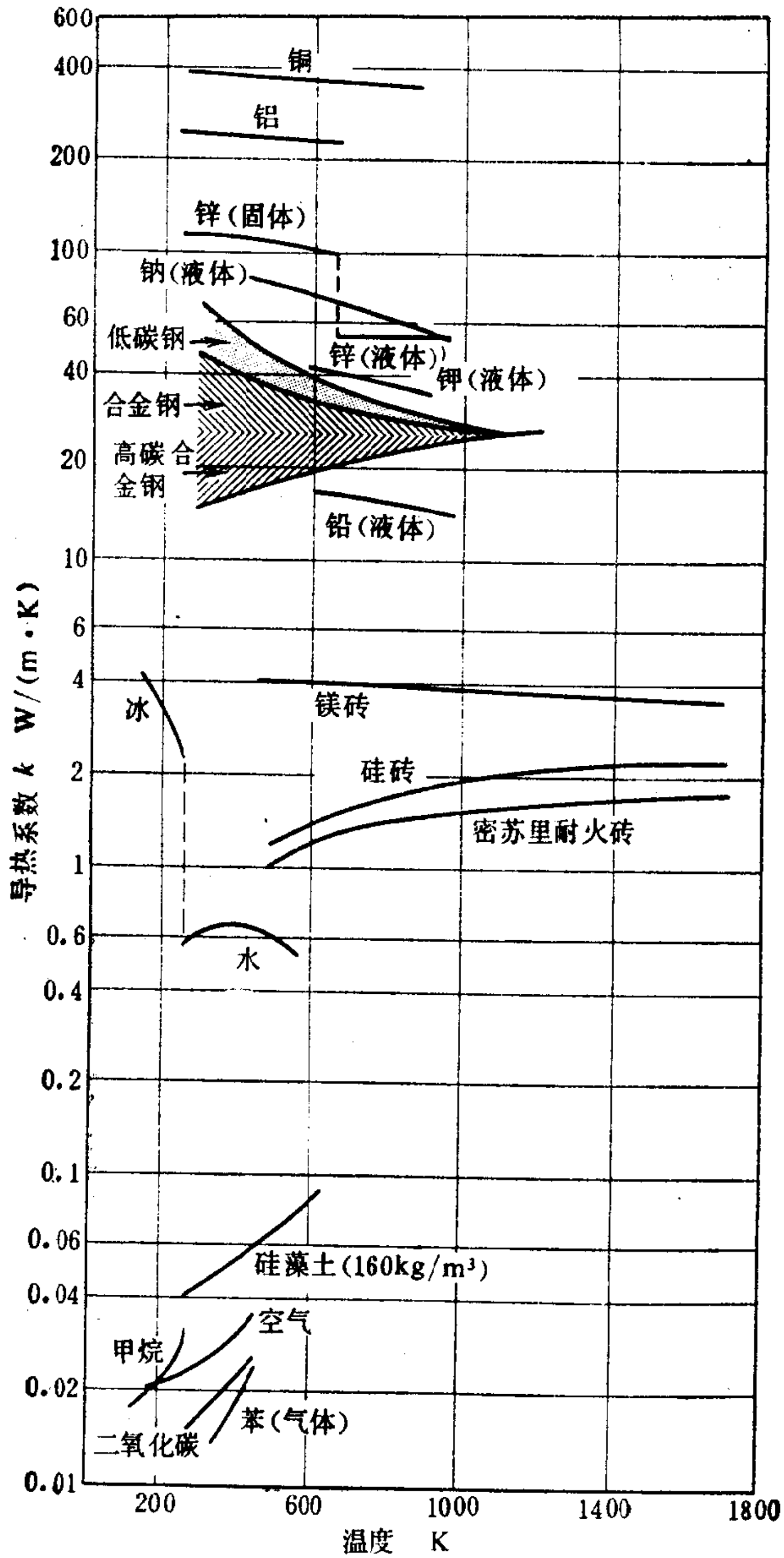


图 1.1 不同材料的导热系数随温度的变化关系

在确定稀薄的单原子气体的导热系数时，可以作一些重要的分析工作。关于单原子气体的初步的分子运动理论，读者可以参考伯德(Bird)、斯图尔特(Stewart)和莱特伏特(Lightfoot)²或威尔蒂(Welty)、维克斯(Wicks)和威尔松(Wilson)³的著作。假设气体分子是个刚性球体，那么导热系数 k 的方程是

$$k = \frac{1}{\pi^{3/2} d^2} \sqrt{\frac{\kappa^3 T}{m}} \quad (1-3)$$

式中 d 是分子直径； κ 是玻尔兹曼常数； T 是绝对温度； m 是气体介质每个分子的质量。

这个关系式表明，导热系数是温度的 $1/2$ 次方的函数，与压力无关，其随温度的变化关系比实验的结果弱一些，而在约 10 个大气压以下，大多数气体的导热系数与压力无关这一结论是正确的。式(1-3)和导出该式的简明分析虽然是粗略的，但不应认为是没有用的，因为从定性的角度来说，式(1-3)中的结论是对的，它为预测导热系数 k 随温度和压力的变化提供了一个基础。

在恰普曼-爱恩思克(Chapman-Enskog)导热系数的理论中⁴，对于单原子气体，一种更完善的分子间作用力的模型已被采用。恰普曼-爱恩思克的公式是

$$k = \frac{8.3224 \times 10^{-2} \sqrt{T/M}}{\sigma^2 \Omega_k} \quad (1-4)$$

式中， k 是导热系数，单位是 $W/(m \cdot K)$ ； T 是绝对温度，单位为 K ； M 是分子量； σ 和 Ω_k 是与列纳德-琼斯 (Lennard-Jones) 分

2. R. B. Bird, w. E. Stewart, and E. N. Lightfoot, Transport phenomena (New York: John Wiley and Sons, Inc., 1960), chap. 8.

3. J. R. Welty, C. E. Wicks, and R. E. Wilson, Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer 2nd ed. (New York: John Wiley and Sons, Inc., 1976), chap. 15.

4. S. Chapman and T. G. Cowling, Mathematical Theory of Non-uniform Gases 2nd ed. (Cambridge: Cambridge University Press, 1951).

子间力势模型有关的列纳德-琼斯系数。 σ 和 Ω_k 的值可以在引述的参考书中查得, 也可以在海什菲尔德(Hirschfelder)、寇蒂斯(Curtiss)和伯德⁵ 的著作中查到。式(1-4)再次指明, 导热系数 k 与压力无关, 它是温度 T 的 $1/2$ 次方的函数。

图 1.2 和图 1.3 中给出了给定温度和压力下导热系数的许多有用的数据和资料。图 1.2 表明: 给定条件下的导热系数与临界点的导热系数的比值, 即对比导热系数 $k_r = \frac{k}{k_c}$, 是对比温度 $T_r = T/T_c$ 和对比压力 $p_r = p/p_c$ 的函数。这个线图是为预测单原子气体的导热系数而绘制的, 但也可以用来确定多原子气体导热系数 k 的近似值。表 1.1 中给出了某些常见气体的 k_c 、 T_c 和 p_c 的数值。

表 1.1 气体的临界常数

物 质	分子质量	T_c K	P_c MPa	k W/(m·K)
空气	28.97	132	3.69	38.0
O ₂	32.00	154.4	5.04	44.1
N ₂	28.02	126.2	3.39	36.3
CO	28.01	133.0	3.50	36.2
CO ₂	44.01	304.2	7.39	51.0
NO	30.01	180.00	6.48	49.5
N ₂ O	44.02	309.7	7.27	54.8
Cl ₂	70.91	417.0	7.71	40.6
Ne	20.18	44.5	2.73	33.1
Ar	39.94	151.0	4.86	29.7
Kr	83.80	209.4	5.50	20.7
CH ₄	16.04	190.7	4.64	66.1

图 1.3 中, 对比导热系数 k^* 是比值 k/k^0 , 它是给定温度和压

5. J. O. Hirschfelder, C. F. Curtiss, and R. B. Bird, Molecular Theory of Gases and Liquids(New York: John Wiley and Sons, Inc., 1954).

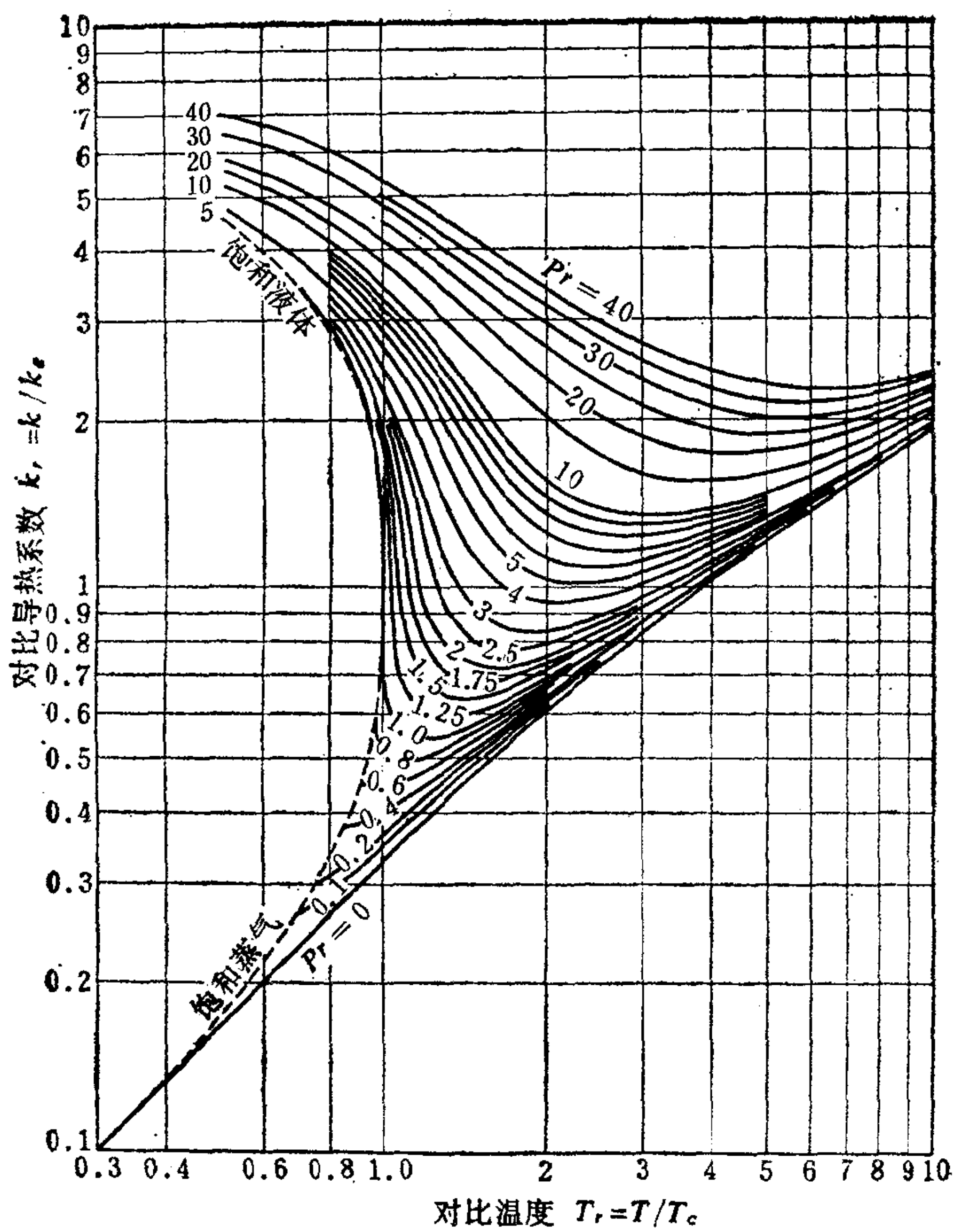


图 1.2 单原子气体的对比导热系数与对比温度和对比压力的函数关系 [摘自 E. J. Owens and G. Thodos, AIChE Journal 3(1958): 461.]

力下的导热系数与同样温度和大气压力下的导热系数的比值。图 1.3 比图 1.2 更有用，因为 k^0 比 k_e 更容易求得。在应用图 1.2 时，得到的多原子气体的任何 k 值只应该认为是近似值。

附录 A-3 中，列表给出了人们感兴趣的许多气体导热系数作为温度函数的数值。