

清华大学出版社

传热应用与分析

罗 棣 庵

TK124
27

传热应用与分析

罗 棣 庵

清华大学出版社

内 容 提 要

本书是为加强高等学校本科生应用传热学基础知识解决工程实际问题的能力而编写的教学用书。

全书共四章(导热、对流换热、辐射换热和换热器),每章列有从生产实际、自然界和生活中精选的若干思考题,供读者检验独立解决实际问题的能力,并引导读者对各种传热现象进行深入的思考与分析。书中应用建立正确的基本概念、对比分析和解决实际问题的方法,通过不同层次由浅入深地加强了各种传热过程的机理的讨论,并通过例题着重对读者进行实验求解法、分析求解法和工程中广泛应用的量级定性分析法的训练,使读者不但掌握分析问题的方法而且还具有一定的工程数字概念。

本书适用于热能工程以及动力机械类各个专业,既可作为选修课教材,也可作为学习传热学以及研究生准备入学考试的参考书,同时还可供有关工程技术人员自学时参考。

传 热 应 用 与 分 析

罗棣庵

•

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京昌平区振南排版厂排版

河北保定科技印刷厂印装

新华书店总店科技发行所发行

•

开本: 850×1168 1/32 印张: 13.5 字数: 349千字

1989年10月第1版 1990年3月第1次印刷

印数: 0001—4000

ISBN 7-302-00452-8/TK·14

定价: 3.20 元

目 录

绪论	1
第一章 稳定导热	5
§ 1-1 导热系数与导热机理	6
§ 1-2 两等温面之间的稳定导热与热阻	24
§ 1-3 通过肋片的稳定导热	41
§ 1-4 物体具有内热源时的稳定导热	52
§ 1-5 稳定导热的数值解法	61
参考文献	101
第二章 对流换热	103
§ 2-1 对流换热的实验研究	104
§ 2-2 边界层分析	132
§ 2-3 单相介质受迫流动时的对流换热	170
§ 2-4 流体在大空间内的自然对流换热和蒸汽的膜层 凝结换热	197
§ 2-5 具有相变时的对流换热	214
参考文献	261
第三章 辐射换热	265
§ 3-1 由透明介质隔开的固体表面间的辐射换热	267
§ 3-2 气体和火焰辐射	298
§ 3-3 太阳辐射	312
§ 3-4 辐射换热系数	317
参考文献	321
第四章 换热器	322

§ 4-1	传热的增强与间壁式换热器的发展·····	323
§ 4-2	换热器的热计算·····	351
§ 4-3	实际换热器的热力设计·····	363
§ 4-4	换热器性能的评价·····	383
参考文献·····		385
附录 ·····		388
附录1	固体材料的热物理参数·····	388
附录2	气体的热物理参数·····	394
附录3	液体的热物理参数·····	400
附录4	水和水蒸汽的比热、粘度和导热系数随温度、 压力的变化曲线·····	405
附录5	各种材料的黑度·····	409
附录6	换热器温差修正系数 ϵ_{Δ} ·····	410
附录7	换热器效能 ϵ -NTU曲线图·····	419
附录8	污垢热阻参考值·····	423
附录9	高斯误差补函数的一次积分值·····	424
附录10	双曲函数表·····	425

绪 论

近20年来,由于工业的发展和科学技术的进步,使传热学在促进新能源的开发、能源的节约以及许多工艺生产过程的控制等方面起着日益重要的作用。生产的发展使传热学不但是一门专业基础课程,而且逐渐发展成为一门专业课程。然而,作者在多年的教学和科研工作中发现,许多刚走上工作岗位的大学毕业生,常缺乏独立地运用传热学的基础知识去解决工程实际问题的能力。而且有不少学生在分析解决实际问题时,又暴露出来不少基本知识方面的错误概念,从而在实际工作中造成直接或间接的经济损失。

为此,作者于1982年起,在诸如热能、空调等与热能利用密切相关专业的本科高年级里,开设一门介乎专业基础课与专业课之间的“传热应用与分析”课程。把作者多年在教学和科学研究工作中收集到的一些实际问题,让学生自己独立地去解决。使学生在教师的指导下通过独立的分析和共同的讨论,逐步提高独立分析和解决实际问题的能力,且巩固并加深学生对刚刚学过的传热学基础知识的理解与掌握。这门课程开出之后,很快就受到学生的欢迎。作者曾多次应邀到校外作短期讲授交流,均取得较满意的效果。这本教材是作者根据多次教学实践编著而成。

此外,从60年代中期起,在传热学的研究工作中引进了电子计算机和诸如光学测量技术,使传热学的发展进入了一个新阶段,传热学的内容得到更新和充实。因此,在工业建设中有日益增多的技术人员要求再学习,以更新和提高他们的基础理论知识

和理论分析能力。通过对实际问题的分析来讲述基础理论知识和分析方法，较容易为他们所接受。因此，这本教材也可以作为工程技术人员参考书。

同时也可作为研究生自学参考书，以提高他们独立分析问题的能力。

全书共分四章：稳定导热、对流换热、辐射换热以及换热器。在第一章稳定导热中共分五节，重点放在讨论各种材料内的导热机理以及分析求解方法。在§1-1中通过对各种材料导热系数的讨论，建立气体、非金属介电体、金属以及保温材料中导热的几种不同物理模型，通过各种不同物理模型的定性分析，得出影响气体、硅酸盐材料、金属材料以及保温材料等的导热系数的主要因素，同时介绍了现代用来测定上述材料导热系数的稳定方法。在§1-2中，通过圆管壁的稳定导热着重讨论如何从工程实际问题中经过合理的简化建立物理模型，并根据物理模型建立数学描述的方法。在这一节中还把工程中常遇见的稳定导热问题归纳为两个等温面之间的稳定导热，而这类问题计算的关键是求热阻值。通过对圆管壁导热的分析揭示了热阻值的求解过程，并列表介绍了工程上常见的一些热阻计算公式以及对热阻的定性分析。在§1-3中结合肋的分析，进一步讨论了分析求解法，并专门讨论了肋片的选用和设计。在§1-4中结合几个工程实际问题讨论物体具有内热源时的稳定导热，主要目的是让读者运用前几节所学的分析求解法来求解工程实际问题。在§1-5中着重介绍了数值解法的基本概念：导热微分方程的建立，数值表达式的基本原理，数值计算方法及其选用原则，数值求解的准确性、收敛性和稳定性等等。考虑到一些早期毕业的读者可能在这方面接触较少，所以介绍时力求详细。对于已经学过数值分析的读者，应该结合导热过程的特点着重讨论求解方法选用原则，误差的形成和减小的方法，稳定性的判定以及边界条件的处理方法等。

第二章对流换热也分五节。在§2-1、§2-2中虽然都是讨论求解对流换热的方法，但着重点不同。在§2-1中介绍实验求解法。由于目前工程实际中的对流换热问题主要是靠实验求解，因此应该要求大学毕业生掌握这种方法并能结合实际问题的应用。所以在讨论时不但结合具体问题，而且尽量详细。着重在相似分析方法上的训练以及实验系统设计和实验安排的具体实际问题的讨论；如果有可能，读者应该到实验室去结合不同的实验系统进行具体的分析。在§2-2中介绍边界层分析的方法。重点放在建立边界层的物理模型以及应用它进行定性分析的方法上。众所周知，许多对流换热的物理模型都是建立在边界层概念之上的。因此，对边界层物理模型的正确理解，会给以下各节的学习打下坚实的基础。在§2-3中，集中讨论单相流体的受迫流动换热。着重讨论各种具体换热现象物理模型的建立以及对它们进行定性分析的方法，使读者将§2-2中刚学到的方法能结合实际例子加以应用。这样安排，不但能使读者逐步增长其独立分析实际问题的能力，而且在定性分析时能作出量级估算，做到“胸中有数”。在进行定性分析之后还介绍了各种换热准则关系式，且在讨论时特别注意把换热准则关系式与相应的换热物理模型联系起来，使大家能看到换热准则方程式不单纯是实验数据的数学拟合，同时也贯穿着对物理模型的正确建立与理解。

用对比分析方法可以深化对物理模型的理解。§2-4以大空间内竖壁附近的自然对流和竖壁上蒸汽的膜状凝结为例，对这两种物理模型颇相似的换热现象进行对比分析。通过这种分析，不仅能加深对这两种物理模型的认识，更重要的是学习分析问题的方法。

在§2-5中讨论了两相换热，在分析中注意了实际工程上的应用，例如，对管内沸腾的计算给予更多的注意。在§2-6中，扼要介绍了热管的工作原理。考虑到碳钢-水热管在节能工程中

应用的良好前景，对这种热管作了专门的讨论。

第三章辐射换热，主要围绕辐射换热三要素：温度、黑度、角系数来叙述。着重点放在被透明介质隔开的固体表面间的辐射换热问题。

第四章换热器，它是传热学知识应用的主要对象之一。因此，结合换热机理对当前最常用的几种换热器作了较详细的分析，为换热器的选型设计打下坚实的基础。

全书后面列有附录10则，便于在进行定性量级分析和定量计算时查询。

由于这门课程是在教学改革中的一种尝试，而在每次讲授中又都在不断地修改。再加上编写时间匆忙，谬误之处敬希读者帮助指出，以便使这本教材在进一步实践中不断提高。

第一章 稳 定 导 热

导热是一种直接接触的传热过程，它依赖于内部微观的分子运动而不发生各部分物质之间宏观的相对位移。所以，有时又把这种能量迁移过程称为分子导热。只有在密实的不透明固体内部才会出现单纯的导热。

发生在稳定温度场内的导热称为稳定导热。各种换热设备在正常工作条件下的导热都是稳定的。由于大多数工程设计都是以正常工作条件为依据，所以稳定导热具有重要的工程意义。

指导导热计算的基本定律是由傅里叶于1822年提出来的，它把热流密度 q 和温度场联系在一起，如下式所示：

$$q = \lambda (-\text{grad}t) = -\lambda \text{grad}t, \text{ W/m}^2 \quad (1-1)$$

这就是傅里叶定律的数学表达式。式中 $\text{grad}t$ 为朝着温度增加方向的温度变化率，称为“温度梯度”。式中的负号表明：导热的方向与温度梯度的方向相反，永远顺着温度降低即温度降度的方向。式中引进的比例系数 λ $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，称为导热系数，它是物质的宏观性质，一种衡量物质导热能力的热物性参数，即每单位温度降度所容许通过的热流密度。由于在导热计算中必须确定物质的导热系数；因此，要求技术人员不仅要熟悉各种材料 λ 数据的变化范围和主要测定方法，而且还要了解影响 λ 的主要因素。所有这些都与物质的导热机理密切相关。

应该指出，傅里叶定律不受温度场种类的限制，稳定的、不稳定的、一维的和多维的都能适用，它是解决所有导热问题的基础。在后面的各个章节中，结合具体情况，利用它和热力学第一

定律，可以推导出各种形式的导热微分方程式。根据相应的定解条件和选用恰当的求解方法就可得出工程计算所需的结果。

根据工程实际应用的需要，本章把稳定导热问题归纳为以下几个方面，并逐一进行分析和讨论：

1. 导热系数与导热机理
2. 通过两等温面之间的稳定导热与热阻
3. 通过肋片的稳定导热
4. 物体具有内热源时的稳定导热
5. 稳定导热的数值计算

§ 1-1 导热系数与导热机理

在工程实际的导热计算中，无论是计算热流密度或是物体内部的温度分布，都必须具有材料导热系数的可靠数据以及了解影响该材料导热系数的主要因素。因此，在这一节中我们不但要给出各种材料导热系数的变化范围和测定它们的主要方法以及主要误差来源；而且还力图引导读者正确理解各种物质内的导热机理，从而掌握不同材料导热系数的变化规律。为了帮助读者能深入地进行思考，每节之首列出工程实际中收集到的一些问题编成的思考题供读者参考。此外，还选择一些典型的实例作出示范性的具体分析，作为读者回答问题时的借鉴。

思考题

1. 迄今为止，描述物质内部导热机理的物理模型有哪些？用它们可以分别描述哪些物质内部的导热过程？
2. 按影响程度大小依次写出影响下列各物质内部导热过程的主要因素，并说明其影响的规律：气体、非金属介电体、金属、绝热保温材料、耐火材料、液体、液态金属。

3. 试依据传热原理和导热机理分别设计一个测量下列物质导热系数的实验装置，并画出其工作原理图，指出要测量哪些物理量，列出为减小误差应该采取哪些主要措施：气体、液体、非金属材料、金属、绝热保温颗粒和纤维材料。

4. 在工程中有空（气）冷发电机、氢冷发电机和 CO_2 冷却的原子反应堆、氦冷原子反应堆，试从导热机理出发分析它们之间的差异和优劣。

5. 根据导热机理回答下述问题，并解释其原因。

a. 冰、水、水蒸汽的 λ 哪个高？列出其量级范围。

b. 同一物质的理想晶体与实际晶体的 λ 哪个高？

c. 采用空气夹层作为保温措施时应注意些什么？用抽真空降压的办法能否提高其保温性能？

d. 高温下气体导热系数的测定有何困难？在实际计算中能否用常温下的数据来替代？

e. 常温下干红砖的 $\lambda = 0.46 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$ ，水的 $\lambda = 0.6 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$ ，试问湿透了的红砖的 λ 应处在下述哪个范围内： $0.46 < \lambda < 0.6 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$ ； $\lambda > 0.6 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$

f. 混合气体的导热系数能否根据其组成气体的 λ 并应用相加定律来计算？

g. 什么叫金属的超导性？目前获得这种特性要具备哪些条件和消耗什么代价？

h. 对于固体，在测定它的导热系数时什么情况下试材的厚度会影响 λ 的数值？

i. 对室内冷冻管道和热力管道的保温层设计有何不同？室外和室内热力管道的保温层设计又有何不同？

j. 几何形状复杂的可控硅铝质风冷散热器用钢模铸成，由于纯铝流动性差，铸造中废品率高，所以在铝中加以极少量硅可大大改善其流动性以提高其成品率，试判断硅加入后 λ 会作何变

化？此一变化与加进去的硅含量的多少是否有关？

5. 纯金属晶体和非金属晶体都是晶体，为何前者的 λ 比后者高很多？

6. 用稳定法平板导热仪对某厂提供的保温试材的 λ 进行测定，试验时从低温开始，依次在6个不同温度下测得6个 λ 数值。这些数据表明该材料的 λ 随温度升高而下降，这一规律与绝热保温材料的导热机理不符，经检查未发现实验装置有问题，试分析问题可能出在哪里？

7. 在常压下能否研制出一种特殊的保温材料，使它的 λ 比常压和室温下空气的 $\lambda[0.0259\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 要小得多？试就此提出你的设想。

8. 在超低温工程中要使用 λ 很低的超级保温材料。如果要你去研制一种这样的新保温材料，试从导热机理出发设计一种超级保温材料，列出你为降低 λ 采取了哪些措施？并解释其物理原因。

9. 试从导热系数的角度来说明在什么条件下可用水来模拟空气的流动和换热过程？在什么条件下不可以？

10. 试对比分析在气体中由分子热运动产生的能量迁移与在金属中由自由电子热运动产生的能量迁移这两个物理模型的共同点和差异之处。

一、气体的导热系数

当物质相变到气态时，原先存在于液态（或固态）的分子键大大地松开并使分子间的距离增大，分子可沿任何方向自由地运动，其运动范围只受边界壁面或其它分子碰撞的限制。此时，分子本身的体积与每个分子的运动空间相比很小，常可以略去不计（在标准状况下分子的运动空间约为分子本身体积的1000倍）。气体分子在它所占容积内的分布是随机性的，适合于用统计力学和分子运动论的方法来处理，根据以简单的分子运动模型为基础

的经典分子运动论得出：

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho \bar{w} l \cdot c_v \quad (1-2)$$

式中， ρ 是气体的密度， $\bar{w}$ 和 l 分别是气体分子运动的平均速度和平均自由行程， c_v 是气体的定容比热容。基于同一分子碰撞机理并与气体动量传递有关的物性粘度，可以和导热系数关联起来，表成下列形式

$$\mu = \frac{1}{3} \rho \bar{w} l \quad (1-3)$$

所以对于这个简单的模型

$$\lambda = \mu c_v \quad (1-4)$$

根据这一简单物理模型得出的结果，式(1-2)一式(1-4)，在变化趋势上是正确的，但是不能用式(1-2)一式(1-4)来准确计算导热系数和粘度。在工程计算中所需的有关气体的 λ 和 μ 的数据都是直接由实验测得的。然而我们可以应用上述公式相当满意地对实际问题进行定性分析，以及借助它们来确定影响气体导热系数和粘度的主要因素。

依据经典的分子运动论和麦克斯韦分布函数，可以将分子运动的平均速度表示为

$$\bar{w} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (1-5)$$

$$c_v = \frac{f}{2} \cdot \frac{R}{M} \quad (1-6)$$

式中， R ——通用气体常数，

M ——气体的分子量，

T ——气体的绝对温度，

f ——分子运动的自由度。

将式(1-2)和式(1-5)、(1-6)联系起来分析，可以看

出气体的分子量 M 对 λ 的影响最大。实验数据可以证实这一结论。例如，在300K下氢气的 $\lambda=0.182\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，约为空气 $\lambda=0.02624\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的7倍。在电机制造业中应用氢冷来代替空气冷却，可以使发电机和变压器的单位容积功率大大提高。

由于气体的定容比热容和分子运动的平均速度都随温度的升高而增加，所以从式(1-2)和式(1-5)中可以看出，气体的 λ 也是随温度的升高而增加的。对于远离液相并近似符合理想气体定律的气体，其实验结果也与这种变化趋向相符。例如，400℃下空气的 $\lambda[0.0521\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 比20℃的 $\lambda[0.0259\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 约高一倍。图1-1中给出了几种常用气体的 λ 随温度变化的曲线⁽¹⁾。

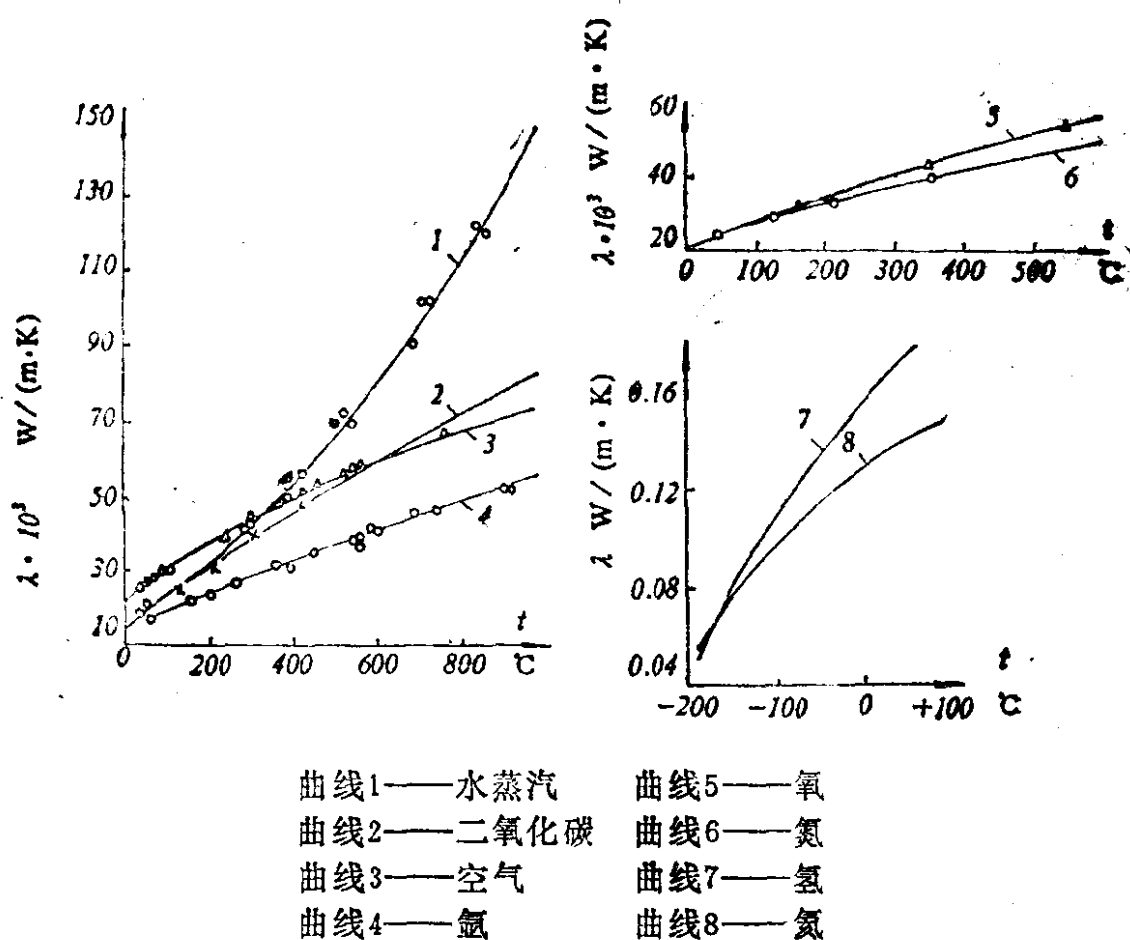
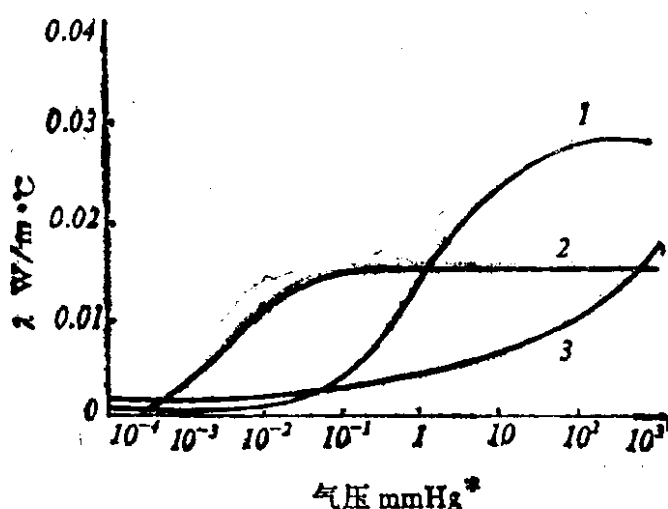


图 1-1 几种常用气体的 λ 随温度的变化⁽¹⁾

在相当大的压力范围内（从2.67kPa到200MPa），可以认为气体的 λ 不随压力变化；这是因为气体的密度随压力的升高而增加，但分子平均自由行程却随压力的升高而减小，两者变化产生的影响互相抵消的结果。基于这一分析，在一般热工计算中常近似地认为气体的 λ 不随压力而变化。只是在很高的压力（大于200MPa）或很低的压力下（参见图1-2），气体的 λ 才会发生明显的变化。



曲线1——珍珠岩粉（ $\phi 180-500\mu\text{m}$ ）的填充层（厚25.4mm）。
 曲线2——空气层（厚25.4mm）。
 曲线3——无定形硅酸盐粉（ $\phi 0.025\mu\text{m}$ ）的填充层（厚25.4mm）。
 * 1mmHg = 133.322Pa

图 1-2 在低压下空气导热系数随压力的变化^[15]

接近液态的过热水蒸汽及其它真实气体与理想气体有很大的区别，导热系数不仅随温度变化，而且也明显地随压力而变化（参见图1-3）。从图1-3中还可以看出，当接近临界态时，导热系数随温度和压力的变化尤为剧烈。所以近临界态流体的换热问题不能再当成常物性流体来考虑，必须考虑物性变化带来的影响。

混合气体的导热系数不能根据其组成气体的导热系数和相加

定律来计算。1917年Wassiljewa用50%的 H_2 和50%的 O_2 组成的混合气体做实验，发现 $0^\circ C$ 时混合气体的导热系数比相加平均值

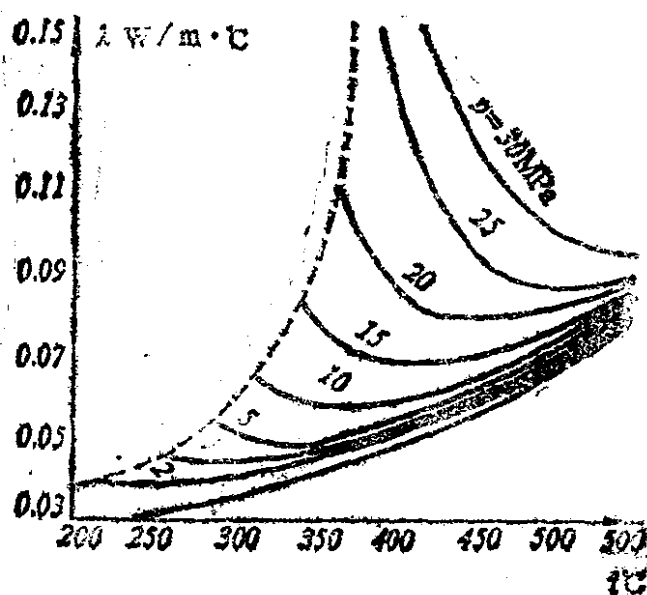


图 1-3 过热水蒸汽导热系数随压力变化

要低20%^[2]。1928年Gruess和Schmick用60%的空气和40%的 NH_3 做实验得出 $80^\circ C$ 时混合气体的导热系数比相加平均值要高8%^{[3][4]}，情况正好与上面的相反。到目前为止尚无很好的理论来阐明其中原因。因此，混合气体的导热系数仍然依赖于实验测定或根据由实验数据综合整理出的经验公式来计算。

多年来许多科学工作者对气体的导热系数进行了实验研究，取得了大量精确的数据。Eckert和Goldstein在他们的著作^[5]中对这方面的工作进行了很好的综述。常用的稳定测定方法有：线性热流法、热线法和径向热流法。它们的原理图分别表示在图1-4(a)、(b)和(c)中。为了提高测试数据的精确程度，在实验装置中应采取措施减少漏热损失、自然对流和热辐射的影响。例如，在图1-4(c)中采用保护电炉，在图1-4(b)中采用很细的热线从而防止或减少端部的漏热损失。在图1-4(a)中采用热源