

传热学

高等学校试用教材
西安交通大学
杨世铭 主编

高等教育出版社



585410

TK124
12-2

高等学校试用教材

传 热 学

西安交通大学 杨世铭主编



C0245053

高等教育出版社

TK124
12-2

HK24114
序

本书为一九七七年十月教育部召开的高等学校工科基础课教材座谈会确定编写的教材之一。在一九七七年十二月的青岛教材会议上,由西安交通大学提出编写大纲草案,与会的十余所高等院校的代表,对大纲草案进行了深入的讨论,确定编写一本适用于70~100学时的传热学试用教材。本书就是按青岛会议决定的大纲编写的。

全书共分八章,除了分章深入讨论导热、对流、辐射及传热过程与换热器的基本理论及计算公式外,最后也对传质过程作了介绍。书中加强了传热问题的分析解法与数值解法的内容,并采用ALGOL 60 算法语言举例说明用电子计算机求解导热问题的方法,同时对量纲分析、实验模化技术等内容也给予了应有的注意。全书采用国际单位制,在必要的地方列出了工程单位制的数值以资对照。每章末附有习题及参考文献。

学习本书时,在数学基础方面学生除应掌握微积分的一般知识以外,还应对常微分方程与偏微分方程、数值计算方法及算法语言有所了解。考虑到各个学校与专业在课程次序及内容安排上不尽一致,故本书在用到上述内容之处均作了必要的说明。如果学生已经系统地学过上述三门课程,则教师可按具体情况对讲授内容作相应的调整。

本书于一九七九年七月在西安审稿会议上由清华大学主审。参加会议的还有山东工学院、哈尔滨工业大学、南京工学院、天津大学、上海交通大学、重庆大学、华中工学院、华北电力学院、东北电力学院、吉林工业大学、上海化工学院、武汉工学院、大庆石油学

院、西南石油学院、成都农机学院、海军工程学院、云南工学院等兄弟院校的代表，他们对初稿提出了不少宝贵意见，使本书质量有了明显的提高。编者在此谨向他们表示衷心的感谢。

本书由西安交通大学热工教研组杨世铭主编，参加编写的还有陈钟頔(第三、六章)、王启杰(第四、八章)、林梓硕(第五章)和陶文铨(第一、七章)，全书最后由杨世铭修改定稿。书中绝大部分插图由西安交通大学印刷厂绘制。

由于编者水平有限，编写时间短促，书中缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

1979年9月

目 录

主要符号表	17
└ 第一章 绪论	1
1-1 热量传递的三种基本方式	2
1-2 传热过程和传热系数	10
1-3 热阻	17
1-4 量纲与单位	23
└ 第二章 导热基本定律及稳态导热	36
2-1 导热基本定律	36
2-2 通过平壁和圆筒壁的导热	41
2-3 通过肋片的导热	50
2-4 导热微分方程式	59
2-5 导热问题数值法求解原理	65
2-6 计算机解题介绍	75
2-7 接触热阻	80
└ 第三章 对流换热	91
3-1 对流换热概说	91
3-2 对流换热的数学描写	93
3-3 层流边界层微分方程组	99
3-4 边界层积分方程组	108
3-5 强制对流换热的理论解	113
3-6 动量与热量转移的比拟理论	129
3-7 量纲分析及其在对流换热中的应用	138
3-8 单相介质对流换热的实验计算式	148
3-9 模化实验技术简介	163
└ 第四章 凝结与沸腾换热	173
4-1 凝结换热现象	173
4-2 膜状凝结换热计算	175

4-3	影响膜状凝结换热的因素	191
4-4	沸腾换热现象	195
4-5	沸腾换热计算及其影响因素	211
✓	第五章 辐射换热	223
5-1	热辐射的基本概念	223
5-2	黑体辐射	228
5-3	实际固体和液体的辐射 灰体	239
5-4	黑体间的辐射换热及角系数	252
5-5	灰体间的辐射换热	264
5-6	辐射换热的网络求解法	274
5-7	气体辐射	280
5-8	火焰辐射	292
5-9	辐射换热系数	295
	第六章 传热过程与换热器	302
6-1	传热过程的分析 and 计算	302
6-2	换热器型式与平均温压	311
6-3	换热器的热计算	326
6-4	传热的强化	340
✓	第七章 不稳态导热	347
7-1	不稳态导热的基本概念	347
7-2	用集总参数法的简化分析	351
7-3	一维不稳态导热问题的计算及诺谟图	357
7-4	二维、三维不稳态导热问题的计算	374
7-5	不稳态导热问题的数值解法	381
7-6	复杂不稳态导热问题求解方法简述	397
	第八章 质量传递	410
8-1	概说	410
8-2	扩散的基本定律	411
8-3	质扩散率的计算	423
8-4	传质分系数	426
	附录 1 金属材料的密度、比热容和导热系数	438

附录 2	保温、建筑及其它材料的密度和导热系数	440
附录 3	几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	441
附录 4	干空气的热物理性质 ($p=760\text{mmHg}$ $\approx 1.01 \times 10^5\text{Pa}$)	442
附录 5	在大气压力 ($p=760\text{mmHg}$) 下烟气的热物理性质	443
附录 6	饱和水的热物理性质	444
附录 7	干饱和水蒸气的热物理性质	446
附录 8	液态金属的热物理性质	448
附录 9	几种饱和液体的热物理性质	449
附录 10	在大气压力 ($p=760\text{mmHg}$) 下过热水蒸气的热物理性质	450
附录 11	气体和蒸气的质扩散率	450
附录 12	双曲线函数值	451
附录 13	选摘的变相贝塞尔函数值	452
索引	453
外文人名对照表	459

主要符号表

a	热扩散率(导温系数)	w, u, v	速度
c	比热容	x	干度, 角系数
d, D	直径	α	换热系数(放热系数, 给热系数), 吸收率
E	辐射力	β	体积膨胀系数
f	截面积	δ	厚度
F	表面积	ϵ	黑度, 换热器的传热有效度
g	重力加速度	θ	过剩温度
h	高度	Θ	无量纲过剩温度
H	高度, 有效辐射面积	λ	导热系数, 波长
I	定向辐射强度	μ	动力粘度
k	传热系数, 辐射减弱系数	ν	运动粘度
l, L	长度	ρ	密度, 反射率
p	压强(压力)	σ	表面张力
q	热流密度(热通量)	σ_0	黑体辐射常数
Q	热量, 热流量	τ	时间, 穿透率
r	半径, 气化潜热	ω	立体角
R	半径, 热阻		
t	温度		
T	热力学温度(绝对温度)		

第一章 绪 论

传热学的研究对象是热量传递的规律。在现代科学技术里,传热学同传质学、工程热力学、气动热力学、燃烧学等共同构成工程热物理这门技术科学^{[1]①}。

热量的传递是自然界与工程技术中极普遍的一种转移过程。按热力学第二定律,凡有温差的地方就有热量的传递。温差普遍地存在于自然界与各个技术领域中,故无论在能源、宇航、动力机械、化工、制冷、建筑、冶金、机械制造、电工及电子技术,以至于农业、生物、环境控制与保护等部门中都有许多传热问题。特别是能源、宇航、动力机械、化工制冷等部门同传热学的关系尤为密切,这些部门中的许多设备在设计、运行过程中大量地应用着传热学所总结出来的规律。同时,现代科学技术的飞速发展又给传热学提出了新的研究课题,提供了新的研究手段,使传热学的研究范围不断扩大,研究方法不断更新,理论分析不断完善。

就物体的温度与时间的依变关系而言,各种热传递过程可区分为稳态过程(又叫定常过程)与不稳态过程(又叫非定常过程)两大类。凡是物体中各点的温度不随时间而变的热传递过程称为稳态热传递过程,反之则为不稳态过程。各种热力设备在持续稳定运行时的热传递过程属于稳态过程,而在起动、停机过程中所经历的热传递过程则为不稳态过程。各种热力设备的设计往往是以额定功率下持续稳态运行为条件的。本书中第一章至第六章主要讨论稳态的热传递过程。加热、冷却以及热力设备的启动、停车、变工

① 方括号中的数字表示本章中与所述问题有关的参考文献的编号。

况所涉及到的不稳态导热问题在第七章中讨论。同时考虑到质量传递与热量传递有其类似之处，所以在第八章中也对传质过程作了简要的介绍。

为了使用高等数学来分析热传递过程，我们以后总假定所研究的对象是一个连续体，即认为所研究的物体各点上的温度、密度、速度等是空间坐标的连续函数。实际上，只要被研究物体的几何尺度远大于其分子的平均自由行程，则连续体的假定都是满意地成立的^[2]。

在这一章里先扼要介绍热量传递的三种基本方式、传热过程及主要的计算关系式，使读者对传热学的基本内容的概貌有所了解，为以后分章深入学习打下基础。鉴于热阻的概念在分析、解决各种传热问题时应用甚广，故列出专节予以讨论。本书采用国际单位制，为使读者能清晰地掌握国际单位制与目前一些工业部门中仍在使用的工程单位制之间的换算关系，本章在最后对单位制及量纲的问题作了必要的说明。

1-1 热量传递的三种基本方式

热量的传递有三种基本方式：导热、对流与辐射。

1. 导热

热量从物体中温度较高的部分传递到温度较低的部分，或者从温度较高的物体传递到与之接触的温度较低的另一物体的过程称为导热（又称热传导）。在纯导热过程中，物体各部分之间不发生相对位移，也没有能量形式的转换。

从微观角度来看，气体、液体、导电固体和非导电固体的导热机理是有所不同的。在气体中，导热是气体分子不规则热运动时相互碰撞的结果。我们知道，气体的温度越高，其分子的运动动能越大。能量水平较高的分子与能量水平较低的分子相互碰撞的结

果，热量就由高温处传到了低温处。金属导体中有相当多的自由电子，象气体中的分子一样在晶格之间运动。金属导体中的导热主要靠自由电子的运动来完成。在非导电的固体中导热是通过晶格结构的振动(即原子、分子在其平衡位置附近的振动)来实现的，这种机理可以用图 1-1 示意性地加以说明。图中两小球间的弹簧

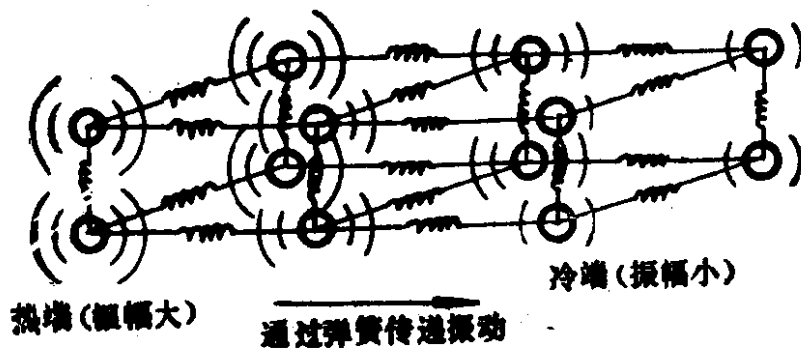


图 1-1 非导电固体中导热机理的比喻

相当于原子(分子)间的作用力,小球的振动通过弹簧来传递,就象原子(分子)的热振动通过相互间的作用力来传递一样。晶格结构振动的传递在文献中常常称为弹性波^[3]。至于液体中的导热机理,有一种观点认为定性上同气体相类似,只是情况更复杂些,因为液体分子间的距离比较近,分子间的作用力对碰撞过程的影响也要比气体大得多^[4];另一种观点则认为液体的导热机理类似于非导电的固体,即主要靠弹性波的作用^[3,5],近年来的研究结果也支持这种观点^[6]。但总的说来,关于导热过程的微观机理目前仍然不很清楚,本书以后的论述限于导热现象的宏观规律。

设有如图 1-2 所示的一块平板,厚为 δ , 表面积为 F , 两个表面分别维持在均匀的温度 t_{w1} 及 t_{w2} 。单位时间内从表面 1 传导到表面 2 的热量(即在 x 方向所传导的热量)可按傅里叶定律

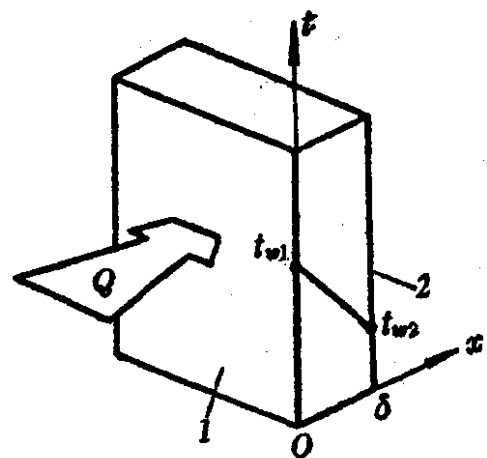


图 1-2 通过平板的导热

计算:

$$Q_x = -\lambda F \frac{dt}{dx} \quad \text{W或 kcal/h} \quad (1-1)$$

式中系数 λ 称为导热系数, 负号表示热量传递的方向同温度升高的方向相反。

单位时间内通过某一给定面积的热量称为热流量, 记为 Q ; 单位时间内通过单位面积的热量称为热流密度(或热通量), 记为 q 。傅里叶定律按热流密度的形式写出为

$$q_x = \frac{Q_x}{F} = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad \text{W/m}^2 \text{ 或 kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (1-2)$$

傅里叶定律又称导热基本定律, 式(1-1)及(1-2)是单向度稳态导热时傅里叶定律的数学表示式。傅里叶定律还可以表示成更完备的向量形式, 将在第二章中讨论。

导热系数是表征材料导热性能的一个参数, 其单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ [或 $\text{kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]。导热系数的数值同材料的种类有关, 对同一材料还取决于温度, 第二章中将进一步讨论。这里仅指出: 金属材料的导热系数最高, 良导体也是良导热体(如银、铜), 液体次之, 气体最小。非金属固体的导热系数变化范围较大, 数值高的同液体相接近, 数值低的(如某些保温材料)则与空气的导热系数具有同一数量级。几个典型的数值是: 20°C 时纯铜的导热系数为 $398 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ [$342 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]; 碳钢($C \approx 1.5\%$)为 $36.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ [$31.6 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]; 耐火粘土砖为 $0.71 \sim 0.85 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ [$0.61 \sim 0.73 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]; 水为 $0.599 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ [$0.515 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]; 超细棉玻璃毡为 $0.037 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ [$0.0318 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]; 干空气为 $0.0259 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ [$0.023 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]。

2. 对流

对流是指流体各部分之间发生相对位移时所引起的热量传递

过程。对流仅能发生在流体中，而且必然伴随着有导热现象。在工程技术上大量遇到的是流体流过另一物体的表面时所发生的热交换过程，我们给予一个专门的名称，叫对流换热。对流换热是流体的对流与导热联合作用的结果。

就引起流动的原因而论，对流换热可区别为自然对流与强制对流两类。自然对流是由于流体冷热各部分的密度不同而引起的，热力设备的表面附近空气受热向上流动就是一例。如果流体的运动是由于水泵、风机或其它的压差作用所造成的，则称为强制对流。冷油器、冷凝器等管内冷却水的流动均属于强制对流。另外，工程上常常遇到的液体在热表面上的沸腾或蒸气在冷表面上的凝结也属于对流换热的范围，并常分别称为沸腾换热与凝结换热。

无论哪一种形式的对流换热，单位时间内、单位面积上所交换的热量均采用牛顿冷却公式来计算：

$$\text{流体被加热时 } q = \alpha(t_w - t_f) \quad \text{W/m}^2 \quad (1-3)$$

$$\text{流体被冷却时 } q = \alpha(t_f - t_w) \quad \text{W/m}^2 \quad (1-4)$$

式中 t_w 及 t_f 分别为壁面温度与流体温度 [$^{\circ}\text{C}$]，如果把两者间的差值记为 Δt ，并约定永远取正值，则牛顿冷却公式可表示为

$$q = \alpha \Delta t \quad \text{W/m}^2 \quad (1-5)$$

比例系数 α 称为对流换热系数^①，常简称换热系数，其单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 或 $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

在实践中经常遇到的流体与固体表面间的对流换热问题中，在流动方向上流体温度与固体表面温度一般都是变化的，不同地点上的换热系数值也常常随之而异，这种局部地点上的换热系数值称为局部换热系数，在理论分析及深入的研究中经常要用到。但

① 习惯上，对流换热系数又常称为对流放热系数(放热系数)或给热系数。

对一般的热工计算来说，最感兴趣的是某一给定表面上的平均换热系数。设在一个面积为 $F \text{ m}^2$ 的换热表面上，流体与壁面的温度差的平均值为 $\Delta t \text{ }^\circ\text{C}$ ，平均换热系数为 $\alpha \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，则总面积上的换热量为

$$Q = F\alpha\Delta t \quad \text{W} \quad (1-6)$$

对流换热系数的大小与换热过程中的许多因素有关。它不仅取决于流体的物理性质 (λ, μ, ρ, c_p 等)、换热表面的形状与布置，而且还同流速有密切的关系。式(1-5)或(1-6)并未具体揭示出影响换热系数的种种复杂因素，而仅仅给出了换热系数的定义。从牛顿冷却公式出发，研究对流换热的基本目的就在于用理论分析或实验的方法来具体揭示各种场合下计算 α 的关系式，这是本书第三、四章的主要任务。表 1-1 中给出了几种最常见的对流换热现象的换热系数数值的大致范围。一般地说，对同一流体，强制对流的换热系数高于自然对流时的值，有相变(即沸腾或凝结)时的换热系数大于无相变时的值。

表 1-1 对流换热系数的大致范围 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]

空气自然对流	3~10
气体强制对流	20~100
水自然对流	200~1000
水强制对流	1000~15000
水沸腾	2500~25000
高压水蒸气强制对流	500~3500
水蒸气凝结	5000~15000
有机蒸气凝结	500~2000

3. 辐射

物体通过电磁波来传递能量的过程称为辐射。物体会因各种

原因发出辐射能，其中因热的原因而发出辐射能的过程称为热辐射。不同的辐射过程有不同的规律，本书中以后所提到的辐射一律指热辐射。

自然界中所有的物体都在不停地向四周发出热辐射能，同时又不断地吸收其他物体发出的热辐射能。辐射与吸收过程的综合结果就造成了以辐射方式进行的物体间的能量转移——辐射换热。当物体与四周环境处于热平衡时，辐射换热量等于零，但辐射与吸收过程仍在不停地进行。

辐射能可以在真空中传播，而导热、对流这两种热传递方式只有当存在着气体、液体或固体物质时才能进行。当两个温度不同的物体被真空隔开时，例如地球与太阳之间，导热与对流都不会发生，只能进行辐射换热。这是辐射换热区别于导热、对流的一个根本特点。辐射换热区别于导热、对流的另一个特点是，它不仅产生能量的转移，而且还伴随着能量形式的转化，即从热能到辐射能及从辐射能转换到热能。

实验证明，物体的辐射能力同温度有关，同一温度下不同物体的辐射与吸收本领也大不一样。一种理想的物体叫做绝对黑体（简称黑体），它能吸收所有投射到其表面上的辐射能，而它所发出的辐射能则是同一温度下所有物体发出的辐射能中的最大值（以单位时间、单位面积而论）。

设一黑体的表面积为 $F[\text{m}^2]$ ，则单位时间内它所发出的辐射能由斯蒂芬-玻尔兹曼定律所揭示：

$$Q = F\sigma_0 T^4 \quad \text{W} \quad (1-7)$$

式中 T ——黑体的热力学温度（绝对温度）K；

σ_0 ——黑体辐射常数，其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 或 $4.88 \times 10^{-8} \text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4)$ 。

一切实际物体的辐射能力都小于同温下的黑体的值，实际物

体的辐射能量总可以表示成斯蒂芬-玻尔兹曼定律的经验修正形式:

$$Q = \varepsilon F \sigma_0 T^4 \quad \text{W} \quad (1-8)$$

式中系数 ε 称为该物体的黑度, 其值小于 1 且与物体的种类及表面状态有关, 详见第五章。其余各符号的意义同式(1-7)。

斯蒂芬-玻尔兹曼定律又称辐射四次方定律, 是整个辐射换热计算的基础。

应当强调指出, 式(1-7)、(1-8)中的 Q 是物体向外辐射的能量, 不是辐射换热量。要计算辐射换热量还必须考虑物体对投射于其上的辐射能量的吸收过程, 详细的讨论在第五章中进行。作为一种最简单的情况, 即两个无限接近的黑体平行表面间的辐射换热的计算作为习题留给读者思考。

在同时存在对流换热和辐射换热的情况下, 工程上为计算的方便, 常常采用类似于对流换热的公式来表示辐射换热量:

$$Q = F \alpha_r \Delta t \quad \text{W} \quad (1-9)$$

或

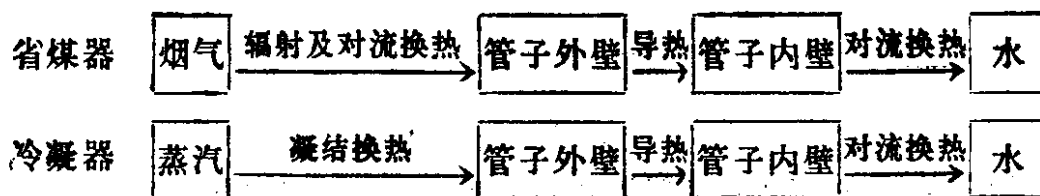
$$q = \alpha_r \Delta t \quad \text{W/m}^2 \quad (1-10)$$

式中 α_r 称为辐射换热系数, Δt 为辐射换热物体间的温差。这样, 总的换热量可方便地表示为

$$Q = F \alpha_c \Delta t + F \alpha_r \Delta t = F \alpha_t \Delta t \quad \text{W} \quad (1-11)$$

式中下角码 c 表示对流换热, α_t 为总换热系数。在本书以后各部分中, 在不致引起误解的情况下, 这些角码不再一一标出。

以上我们分别讨论了导热、对流、辐射三种基本方式。在大多数实际问题中, 这些方式往往是同时出现的。这不仅表现在互相串联的几个换热环节中, 而且对同一环节也常是如此。例如, 对锅炉中的省煤器及汽轮机装置中的冷凝器来说, 热量传递过程中各个环节的换热方式可作如下分析:



最后应当指出，傅里叶定律、牛顿冷却公式及斯蒂芬-玻尔兹曼定律无论对于稳态或不稳态过程都可以使用，对于不稳态过程，式(1-1)、(1-6)及(1-7)中的各量均应视为瞬时值(除换热面积及常数数值外)，且式(1-1)中的 $\frac{dt}{dx}$ 应该改写为 $\frac{\partial t}{\partial x}$ 。

例 1-1 一块厚度 $\delta=50\text{mm}$ 的平板，其两侧表面分别稳定维持在 $t_{w1}=300^\circ\text{C}$ ， $t_{w2}=100^\circ\text{C}$ 。试求下列条件下通过单位截面积的导热量：(1)材料为铜， $\lambda=374\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ；(2)材料为钢， $\lambda=36.3\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ；(3)材料为铬砖， $\lambda=2.32\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ；(4)材料为硅藻土砖， $\lambda=0.242\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ (参见图1-2)。

解 据式(1-2)有

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

在稳态过程中，垂直于 x 轴的任一截面上导热量都是相等的。将上式对 x 作从0到 δ 的积分得

$$q \int_0^\delta dx = -\lambda \int_{t_{w1}}^{t_{w2}} \frac{dt}{dx} dx$$

$$qx \Big|_0^\delta = -\lambda t \Big|_{t_{w1}}^{t_{w2}}$$

$$\therefore q = \frac{-\lambda(t_{w2}-t_{w1})}{\delta} = \lambda \frac{t_{w1}-t_{w2}}{\delta} \quad (1-12)$$

式(1-12)是当导热系数为常数时一向度稳态导热的热量计算式。将已知数值代入得

铜 $q = 374 \times \frac{300-100}{0.05} = 1.496 \times 10^6 \text{ W}/\text{m}^2$

钢 $q = 36.4 \times \frac{300-100}{0.05} = 1.456 \times 10^5 \text{ W}/\text{m}^2$

铬砖 $q = 2.32 \times \frac{300-100}{0.05} = 9.28 \times 10^3 \text{ W}/\text{m}^2$