《应用物理学》

（下）

李永铸　编

西　南　林　学　院

一九九二年六月

目　录

第六章　热的传播规律

在自然界中，不论是固体、液体和气体，由于自然或人为的原因，普遍地存在温度差。热力学第二定律告诉我们，热量总是自发地从高温处传向低温处。研究传热的规律，应用传热规律来研究各种工程技术中的热传递问题是十分有用的。除工程技术部门外，象在农林、生物、环境控制与保护部门都有许多传热问题。

对应用传热规律来解决这些技术中的问题，通常可以分为两种类型，第一种类型是力求传热过程的增强。例如设计各种换热器，通常总是设法增强传热，使换热器的尺寸小，重量轻，成本低。第二种类型则是力求传热过程的削弱。例如各种设备及管道的保温措施实施。

在本章中介绍热的传导，结合了农林学科特点来分析地温的变化、及象温度一类的保温设施建造的理论基础。同时不管自然通风还是强迫通风，都要涉及到热的对流问题。自然界中大气的对流，便是风，这是大家熟知的。除了热传导与对流外，热传播还有一个非常重要的方式，即热的辐射。如果不是持续地从太阳那里辐射到地球上的大量辐射能，地球上的生物就不可能生存；而植物的生长没有光和热显然是不可想象的，因此，植物的环境温度是影响其发育生长的重要因素。环境温度的变化又是由热量转移的规律决定。故弄清热量转移规律是有实际意义的。

现在，热传递的理论正在随着生产实践和科学试验的发展而飞速地发展，对于传热的机理不断地进行深入的探索，许多传热方面的课题不仅通过大量的实验总结出许多有实用价值的计算公式，而且也应用数学知识去获得理论分析解或通过电子计算机得到数值解。

在自然界中，不论是固体、液体和气体，由于自然或人为的原因，普遍地存在温度差。热力学第二定律告诉我们，热量总是自发地从高温处传向低温处。研究传热的现象，应用传热规律来研究各种工程技术中的热传递问题是十分有用的。除工程技术部门外，农业、林业、生物、环境控制与保护部门都有许多传热问题。

应用传热规律来解决工程技术中的问题，一般可以分为两种类型。第一种类型是力求传热过程的强化。例如设计各种换热器，通常总是设法增强传热，使换热器的尺寸小，重量轻，成本低。第二种类型则是力求传热过程的削弱。例如各种设备及管道的保温措施实施。

在本章中介绍热的传导，结合了农林学科特点来分析地温的变化，及象温室一类的保温设施建造的理论基础。同时不管自然通风还是强迫通风，都要涉及到热的对流问题。自然界中大气的对流，便是风，这是大家熟知的。除了热传导与对流外，热传播还有一个非常重要的方式，即热的辐射。如果不是持续地从太阳那里辐射到地球上的大量辐射能，地球上的生物是不可能生存；而植物的生长没有光和热显然是不可想象的。因此，植物的环境温度是影响其发育生长的重要因素。环境温度的变化又是由热量转移的规律决定。故学习热的传播规律是有实际意义的。

现在，热传递的理论正在随着生产实践和科学试验的发展而飞速地发展，对于传热的机理不断地进行深入的探索，许多传热方面的课题不仅能通过大量的实验总结出许多有实用价值的计算公式，而且也应用数学知识去获得理论分析解或通过电子计算机得到数值解。

§6·1 热的传导

热量从一个物体传到另一个物体，或者从物体的这一部分传到另一部分是由于存在着温度差，所以温度差是产生热量传递的动力。

一、热传导　热量从温度较高的物体传到与之接触的温度较低的物体，或者从一个物体中温度较高的部分传递到温度较低的部分叫热传导。单纯的热传导过程由于物体内部分子、原子和电子等微观粒子的运动，将能量从高温区域传到低温区域，而组成物体的物质并不发生宏观的位移。

如果我们分别考察气体、液体、导电固体和非导电固体的热传导机理，它们之间也各有不同。气体中的热传导是由于热运动的气体分子相互碰撞的结果。气体温度高的部分，由于分子运动动能大；温度低部分的分子运动动能小，结果造成热量由高温部分传到低温部分。在金属等导电导体中，主要依靠自由电子的运动使热量传递。在非导电的固体中，导热是通过原子、分子在晶格位置附近振动而实现的，即是通过弹性波来传递能量的。至于液体中的导热情况基本上与非导电固体相似，也是通过弹性波的作用来实现的。

我们研究热传导过程的目的，就是为了计算通过介质传递的热量。要定量地计算热量，首先必须了解物体内温度分布、及组成物体介质的分布情况。

物体内部的温度分布，是与环境温度有关的。按物理学方法，为了使问题简化，我们假定传热介质与两个物体接触，一个是高温物体，叫做“热源”，另一个是低温物体，叫做“冷库”。这样一来，热源和冷库就成为介质的环境。如前所述，只有当环境存在温度差时，介质内部才可能出现温度差，发生热传导现象。

如果热源与冷库的温度是恒定的，则介质内的温度分布也是恒定的。这时，介质内部各点之间可以有温度差，但每一点的温度都是恒定的，并不随时间改变而变化。此种情况下的热传导过程是一个稳定的过程。若热源或冷库的温度随时间而变，则介质的温度分布也将随时间而变，此时的热传导就是一个不稳定过程。下面我们先看介质分布不同时的热传导。

1、均匀介质热传导　经验表明，热量只能由高温物体传递到低温物体，即只有物体各部分间有温度差时，才有热传导发生，具体来说，如果传递热量的介质形状不同，其内部结构不同（即密度不同）时，那末，传递的热量的多少除与高温物体温度和低温物体的温度有关外，还与传递介质的形状及密度有关。这里我们采用一个形状较为简单的传热介质体来讨论均匀介质的热传导的情况。

如图（6・1），有一厚为L、面积为S、且被绝热材料包裹了侧面的，一密度均匀分布的长方体介质。其两端分别与高温（T_1）物体、低温（T_2）物体相接触。若视高温物体为热源，低温物体为冷库，则有温度T_1、T_2均恒定不变（且$T_1 > T_2$）。

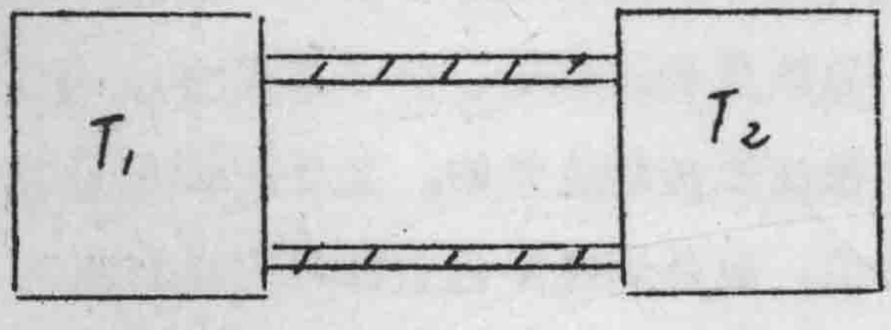


图　6・1

温度T_1和T_2恒定，即是指热源在一段时间Δt内产生的热量恰好补偿了它传给介质的热量时，可认为温度T_1恒定；对冷库来说，由于其吸收了来自介质传递的热量，温度应有所增多，但当冷库很大时，仍可视为温度T_2恒定。如大气对一个火

炉温度来说，就可认为是一个恒温的冷库。

因热传导的起因是温度差的存在，而温度差的存在实质就是温度梯度（dT/dL）的存在。在这里传热介质的密度均匀，因此温度差可用平均温度梯度表示即可。故有平均温度梯度为

$$\frac{T_1 - T_2}{L}$$

实验证明：流过介质某一截面的热量ΔQ与温度差（$T_1 - T_2$）成正比，与所经面积S成正比，与流经时间Δt成正比，与介质长度L成反比，即

$$\Delta Q = K\frac{T_1 - T_2}{L}S\,\Delta t \quad (J) \qquad (6-1)$$

如果用单位时间流过任一截面的热量表示热流，则热流为

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = K\frac{T_1 - T_2}{L}S \quad (W) \qquad (6-2)$$

还可把单位时间内每单位面积通过的热量表示为热流密度q，则有

$$q = K\frac{T_1 - T_2}{L} \quad (W/m^2) \qquad (6-3)$$

各式中K是物体的导热系数，单位是$W/(m\cdot{}^\circ C)$它是物体固有的物性参数，表征物体导热能力的大小。K数值大，表示材料的导热性好，反之则表示材料的导热性能差。

式（6—2）、式（6—3）也叫付里叶定律，只是表示方法不同而已。

对上式从保温角度来看，若要使热源的热量损失较少，则应材

料的热流密度较小越好，即K、S要小，L要大。

值得指出，这里讨论所得的结果，实际与截面积形状无关，如用一园柱体来作热传导介质体，式（6—2、3）仍能用。

2、不均匀介质热传导　对不均匀介质的热传导问题比较复杂。但若介质是由多层不同物质迭合而得，且每一层内介质密度仍然是均匀的，则付里叶定律仍可用。但应注意使用的前提是：热源和冷库的温度T_1和T_2恒定不变，每一层因是均匀介质都有各自的平均温度梯度，且热流在各层中相同。如图（6·2a），由付里叶定理分别可得A_1、A_2、A_3三层介质中的热流为

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t}=K_1S\frac{T_1-T'}{L_1}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t}=K_2S\frac{T'-T''}{L_2}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t}=K_3S\frac{T''-T_2}{L_3}$$

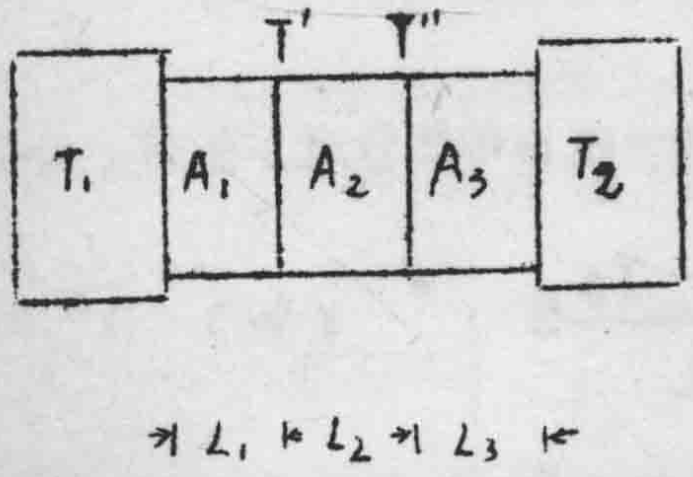


图　6·2a

由此三式消去T′、T″后，可得到

$$T_1-T_2=\left(\frac{L_1}{K_1S}+\frac{L_2}{K_2S}+\frac{L_3}{K_3S}\right)\frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

由此式，我们可得不均匀介质（复合多层介质）热传导时的热流近似计算公式为

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t}=\frac{1}{\frac{L_1}{K_1S}+\frac{L_2}{K_2S}+\frac{L_3}{K_3S}}(T_1-T_2) \quad (6-4)$$

通常，称 $1/K$ 为介质的热阻系数；把 $\frac{L}{KS}$（度/瓦）叫做导热热阻，它的倒数（$\frac{KS}{L}$）叫热导。引入热阻和热导这两个概念，有助于剖析和表达一些复杂的传热过程。传热理论提出的传热密度 q、温度差 ΔT、单位面积导热热阻间的联系，同电路分析的"欧姆定律"是完全类似的。因此导热过程的热路图通常也称为导热过程的模似电路图。如图（6·2a）中的传热介质由三种不同介质串接而得，其热路图为图（6·2b），

图中 L_1/K_1、L_2/K_2、L_3/K_3 分别为三种介质的单位面积导热热阻。

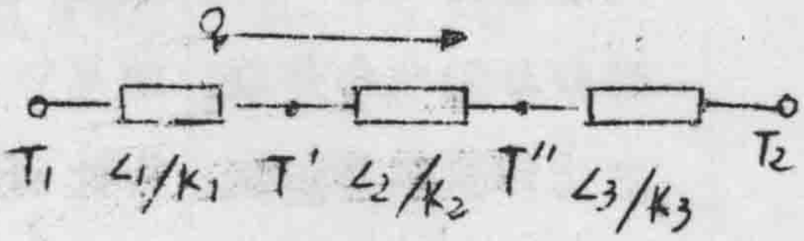


图 6·2b

同理，类比欧姆定律，（6−3）式可改为

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R} \qquad (6-5)$$

且对图（6·2b）来说，$R = \frac{L_1}{K_1 S} + \frac{L_2}{K_2 S} + \frac{L_3}{K_3 S}$。应用热阻这一概念，我们可将传热介质的联接方式加以推广到串联、并联、串并联的情况。

① 若 T_1、T_2 间有若干介质串联联接，则

$$R_{串} = R_1 + R_2 + \cdots = \frac{L_1}{K_1 S_1} + \frac{L_2}{K_2 S_2} + \cdots = \sum_{i=1}^{n} \frac{L_i}{K_i S_i}$$

② 若T_1、T_2间有若干介质并联联接，则

$$R_{并}=\frac{1}{\frac{1}{R}+\frac{1}{R_2}+\cdots}=\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\frac{K_i S_i}{L_i}}$$

对串并联情况也完全可以按照电阻的串并联方式求解。

3、应用　如温度需要稳定不变的温室的保温。此时要保持室内温度平均为20℃，而室外为0℃以下，就得在室内加热，如用若干个电炉分布在室内。注意到传热介质此时为温室的建筑材料，夹层墙由几层不同物质组成，为串联热阻，门、窗、屋顶、地板等部分与墙视为并联，故总热阻为串并联形式。由此可估算出温室散发出热量的总热流，以此确定所需电炉的瓦数。实际上由于还有热辐射的形式散发热量，故所选电炉的瓦数应大一些。结合前一章内容，电炉可接到一个恒温控制电路上，以便自动通电。

二、导热系数K　导热系数的物理含义可由付里叶定律表达式说明，导热系数在数值上等于单位梯度作用下，物体内部引起的热流密度。它是热传导计算中的一个重要参数。

导热系数是材料固有的属性，我们称这种由材料性质确定的物理量为物性量或物理性能参数，以区别象温度之类的状态量。又因我们涉及的这些物性量直接影响传热过程，故又称这些物性量为热物性量，或者简称热物性。

不同材料的导热系数是不相同的，它们之间有的差别可达几千倍。表（6—1）列出了几种常见物质材料在室温下的导热系数。此表格粗略地反映了各种材料的导热系数按大小排列的次序，固体导热系数最大，液体次之，气体的最小。固体材料中，又以金属的

室温下常见材料的导热系数　　　表（6—1）

材　料	K（W/（m·℃））	材　料	K（W/（m·℃））
银	420	木材	$(14\sim36.1)\times10^{-2}$
铜	390	干土	13.8×10^{-2}
不锈钢	19	刨花	6.0×10^{-2}
混凝土	76.5×10^{-2}	水	60.0×10^{-2}
湿土	67.0×10^{-2}	氟里昂	8.0×10^{-2}
玻璃	52.0×10^{-2}	空气	2.6×10^{-2}

导热系数大于非金属的导热系数。据目前资料，导热系数最大的天然材料还是非金属固体金刚石，其值达2300W/（m·℃），约为紫铜的六倍。同一材料，导热系数主要受温度影响。对气体，在高压或接近临界状态时，其导热系数还与压力有关。

工程技术中，通常把导热系数小于0.2W/（m·℃）的材料叫做保温材料，如石棉、泡沫塑料、蛭石等都属于这一类材料。保温材料往往具有多孔的结构特点，这主要是由于材料间隙中存在的空气能起到良好的隔热作用。严格地讲，多孔材料已不应看成为均匀的连续介质。它们的导热系数应看作某个“折算导热系数”，而且，它的大小明显地同材料的容积重量（简称容重）有关。

对大量使用的材料，在相当大的温度范围内，系热系数随温度的改变关系可用如下一次方关系式表示为

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \beta t)$$

式中λ_0是温度为0℃时材料的导热系数，β为导热系数的温度系数，可正可负。

还有一些材料，如木材、石墨以及一些人工制造的超级隔热材料，由于内部各向的结构不同，在不同方向上表现出来的导热能力差别也很大，对于这类各向异性体，在给出导热系数同时，还应指明方向。

要定量地说明材料导热系数的特点，就必须对导热过程的微观机理作出令人信服的解释，但此点目前仍不能做到。理论计算得到的导热系数现在还难以被认可，而大部分材料的导热系数值，现在主要靠实际测量而得。目前已有一系列的实验方法用来测定各种材料在不同温度范围内的导热系数。这些实测的导热系数数据随同其他物性数据一起，被编成图表供人们计算时使用。

三、稳定热传导　传热介质中各点的温度不随时间变化改变的热传导。下面我们先证明稳定热传导的一个重要性质：传热介质体的任意两个横截面上的热流相等。

证明：　如图（6·3），在传热介质体上任取两个横截面，面积分别为S_1和S_2，此则就截出一段体积元ΔV。设流过截面的热量为ΔQ。则单位时间内流入截面积为S_1的面的流量（热流）为$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_1$，单位时间内流出截面积为$S_2$面的热流为$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_2$。在稳定热传导

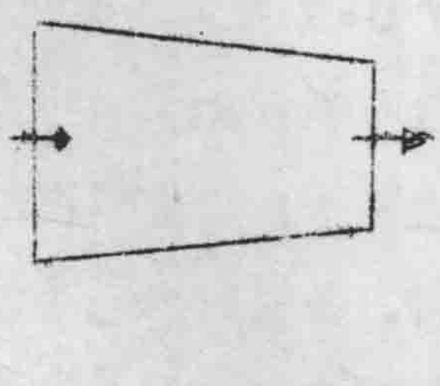


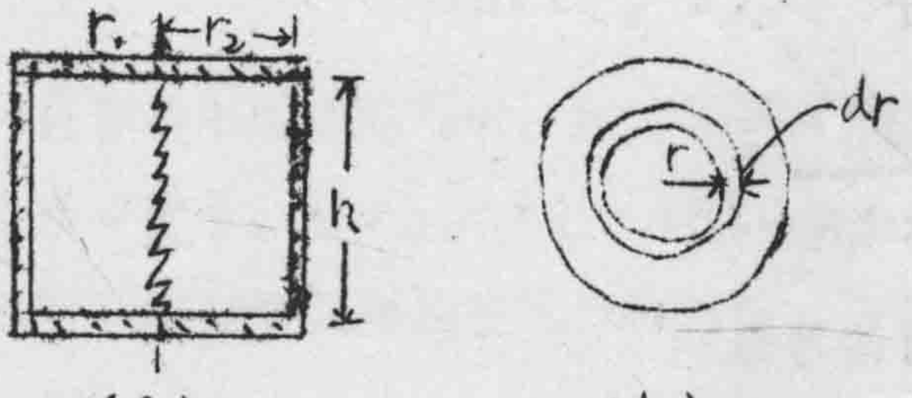
图　6·3

时，体积元内的温度恒定不变，即只有单位时间流入体积元ΔV的热量与流出的热量相等时才可能，否则，体积元ΔV内由于热量的积累（或减少）会导致ΔV温度升高（或降低），使稳定状态被破坏。故

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_1=\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_2$$ 证毕

现在我们用付里叶定律对稳定热传导的应用作如下介绍。这里要讨论的是计算比较简单的园柱形介质的传热情况。

如图（6·4－a）为一园柱形容器模型。容器的高为h，内半径为r_2，在园柱形容器的轴线上装有一根半径为r_1的电热丝，通以电流后作为该系统的热源。在电炉丝周围，即容器内装有气体作为传热介质。容器周围器壁与大气换触，二者构成此系统的冷库。当电热丝通电一段时间后，整个系统达稳定时，电热丝具有温度T_1，器壁与大气的温度为T_2，此时介质中形成一系列的温度不同的同轴园柱面，我们称为等温面，如图（6·4－b）所示。为了精确描述温度的变化，我们将一个有限范围变化（Δ）改用一个微小范围的变化（d）；此时，在半径为r和$r+dr$的两个面上，温度沿半径增大方向降低dT，故温度梯为$-\frac{dT}{dr}$（负号表示半径增加时，温度下降）。将此温度梯度



(a) (b)

图 6.4

代入付里叶定律中后，可求得介质为园柱形时的热流为

$$\frac{dQ}{dt}=-KS\frac{dT}{dr}$$

又因为半径为 r 处的园柱面面积为$S=2\pi rh$，故

$$\frac{dQ}{dt}=-K2\pi rh\frac{dT}{dr} \qquad (6-6)$$

式（6—6）数学上为微分方程式，要得知热流有多大，须先把$\frac{dT}{dr}$的函数形式确定出来。因为在稳定热传导情况下，热流$\frac{dQ}{dt}$为恒量，当介质确定后，其导热系数K也为恒量，容器高度同时为一恒量，故令常数C等于

$$C=\frac{dQ}{dt}\ \frac{1}{2\pi hK}$$

此时，（6—6）式可改写为

$$-C\frac{dr}{r}=dT$$

将等式两端积分，有 $\int -C\frac{dr}{r}=dT$

考虑到积分对象为容器中的传热介质，且等式左端积分变量 r 因为变化范围由电热丝r_1到器壁内壁处r_2，故 r 的积分限应为$r_1\rightarrow r_2$；同时温度变化由电热丝处的T_1到冷库T_2处，即温度积分限为$T_1\rightarrow T_2$。将常数C提出积分号，上式为

$$-C\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r}=\int_{T_1}^{T_2}dT$$

查积分表，得 $-C\ln\frac{r_2}{r_1}=T_2-T_1$ 或 $C=\frac{T_1-T_2}{\ln(r_2/r_1)}$ 故

得 dT/dr 的函数形式为

$$\frac{dT}{dr}=-C\frac{1}{r}=-\frac{1}{r}\frac{T_1-T_2}{\ln(r_2/r_1)} \qquad (6-7)$$

此式表明了，温度梯度 $\frac{dT}{dr}$ 与半径成反比，r很小处即靠近电热丝附近的温度梯度很大。将（6—7）式代入（6—6）式，我们就可以得到计算园柱形介质中热流的公式为

$$\frac{dQ}{dt}=K2\pi h\frac{T_1-T_2}{\ln(r_2/r_1)} \qquad (6-8)$$

例如，当容器中装有空气时，因其导热系数 $K=2.59\times10^{-2}$ 瓦/（米·度），若 $r_2/r_1=1000$，$h=1$ 米，电热丝温度为20℃，容器壁及周围空气为0℃时，则热流为

$$\frac{dQ}{dt}=2.59\times10^{-2}\times2\times3.14\times1\times\frac{20-0}{\ln1000}$$

$$\approx0.47\ \text{瓦}$$

此上述处理过程可看出，若传热介质的形状不同时，付里叶定律均可使用，但此时要注意到不同形状面积会出现不同的积分变量与不同的积分限。

四、不稳定热传导　由于热源或冷库的温度随时间改变时，传热介质中各点的温度T随时间变化的热传导。此时介质中的各点温度分布随时间改变，形成不了固定的等温面，为了解温度T的变化

规律，我们仍采用图（6・1）的模型来讨论。

1、一般情况下的热传导方程　如图（6・5）所示的体积元 dV，由 S_1、S_2 两个等温面组成。因体积元处在不稳定的热传导情况，所以 dV 体积元内的温度 T 会随时间 t 而改变。设某一时刻流入 S_1 面的热流为 $\left(\frac{dQ}{dt}\right)_1$，同一时刻流出 S_2 面的热流为 $\left(\frac{dQ}{dt}\right)_2$，且可能

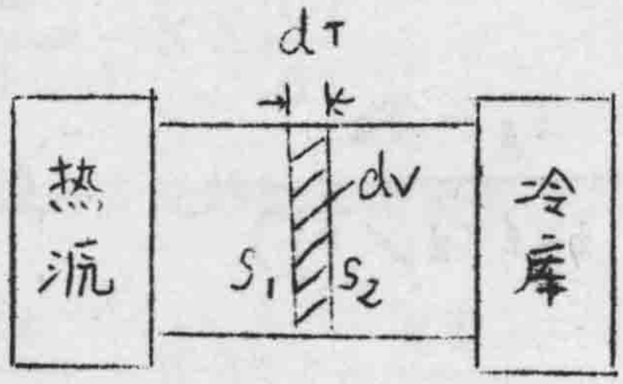


图 6.5

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_1 \gtrless \left(\frac{dQ}{dt}\right)_2$$

即此时体积元内的温度可能增加，也可能下降。现假定体积元 dV 内温度增加，则有单位时间内体积元吸收的热量为

$$\frac{dQ}{dt}=KS\frac{dT}{dL}$$

故单位时间内体积元中热量的增量为 $d\left(\frac{dQ}{dt}\right)$。对物体吸收的热量，我们还可用它升高的温度来计算，即体积为 dV，比热为 C 的物体，其单位时间内吸收的热量的增量为

$$d\left(\frac{dQ}{dt}\right)=C\rho\, dV\frac{dT}{dt} \qquad (6-9)$$

将 $\frac{dQ}{dt}=KS\frac{dT}{dL}$ 代入此式得