

传热基础 600 题 详解

厉家尚 陆大有

王光麟 编译

于广经 陆寿娥

序 言

本《题解》系参考美国普渡大学F·P·因克罗普拉教授和D·P·德威特教授的《传热基础题解》手稿编译而成。在编译过程中编译者发现和校正了手稿中的错误，重新绘制了全部简图。

原书作者在普渡大学长期讲授传热学过程中积累和收集了大量习题，这些习题不仅内容广泛而且具有很强的工程实用性。题解思路清晰，步骤严格，紧密结合《传热基础》书中所讲的基本理论和方法。本《题解》既能使学生巩固所学的传热学知识，又能在解决实际传热问题技能方面得到扎实训练，因此是一本很有实用价值的指导书。它和《传热基础》组成一套理想的传热学教材，是大学有关专业师生和研究生的必读书，也是热能利用、机械、化工、航天航空、建筑、冶金、热物理等各个领域的科研和工程技术人员的必备参考书。

由于本《题解》广泛地引用《传热基础》书中的公式、数据和图表，因此建议读者成套使用，相互参照。

本《题解》由于广经编译第一、二、三章，王光麟编译第四、五、十一章，陆译第七章，厉家尚编译第六、八、九、十章，陆大有编译第十二、十三、十四、

本《题解》在编译过程中得到原著者F·P·因克罗普拉教授和D·P·德威特热情支持，也得到北京航空航天大学金如山教授帮助。特此致谢。

传热问题的分析方法

《传热基础》一书的主要目标是培养读者解决包含传热过程的工程问题的能力。为此，在每章之后都列出了大量练习题。在解答这些练习题的过程中，读者对传热原理会获得更深入的了解，并且对应用这些原理解决实际工程问题的能力增加信心。

我们确信，对要解答的传热问题总存在一个最佳解法。与多少带点偶然性的“随题而变”的解法不同，我们提倡采用由以前介绍过的程序所规定的系统的解题步骤。对这本教材的全部例题我们将始终如一地采用这种解题程序，并且要求学生在解题过程中也这样做。这个程序包括如下几个步骤：

(1) 已知：在仔细地阅题之后，简明扼要地指出问题的已知条件，而不是把问题重复叙述一遍（本书从略）。

(2) 求：简明扼要地指出所要求出的量（本书从略）；

(3) 简图：画出所研究物理体系的简图，要仔细地确定其边界条件。如果预料到要应用守恒定律，要在简图上用虚线表示出所要求的控制面。思考决定该题特征的物理过程，并在简图上用适当的箭头标出相关传热过程；

(4) 假设：列出与本题有关的全部简化假设；

(5) 物性值：列出在后面计算中所必需的材料物性值，并对查取物性值的表格进行鉴定；

(6) 分析：开始对问题进行分析，再应用适当的守恒定律并引进所需的热流方程。在代入数值之前要进行尽可能完善的分析，最后进行运算以求出所要求的结果；

(7) 说明：这里是指对结果的适当讨论，如对关键性结论的概括、推论，以及原始假设的限制条件等。

不要低估了步骤1~4的重要作用，这些步骤提供了一个机会，使读者在实际着手解题之前，对所研究的问题系统地思考一番。

——编者

目 录

传热问题的分析方法

第一章 绪论	(1)
第二章 热传导概论	(22)
第三章 一维稳态热传导	(49)
第四章 二维稳态热传导	(116)
第五章 瞬态热传导	(168)
第六章 对流导论	(238)
第七章 外部流动	(287)
第八章 内部流动	(348)
自然对流	(393)
沸腾与凝结	(430)
换热器	(456)
热辐射过程及其性质	(491)
面之间的辐射能交换	(546)
传热与传质方式的组合	(602)
质量交换	(640)

第一章 绪 论

1.1 穿过一绝热层的传导热流 q 为3kW；该绝热层的横截面积 A 为10m²，厚度 L 为2.5cm。如果内表面（热面）的温度 T_1 是415°C，绝热材料的导热系数 k 为0.2W/(m·K)，问外表面的温度是多少？

解

简图：

假设：

- (1) 一维热传导；
- (2) 稳态状况；
- (3) 均匀介质。

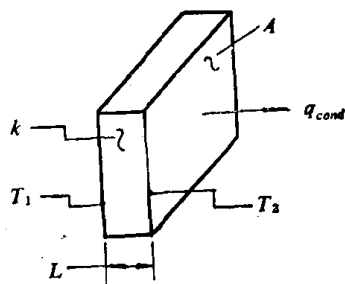


图 1-1

分析：可利用原书方程式① (1.2) 求出给定状况下的热流

$$q_s = q''_s \cdot A = -k \frac{dT}{dx} \cdot A = kA \frac{T_1 - T_2}{L}$$

解出

$$T_2 = T_1 - \frac{qL}{kA}$$

然后代入数值

$$T_2 = (415 + 273)K - \frac{3000W \times 0.025m}{[0.2W/(m \cdot K)] \times 10m^2} = 650.5K$$

$$t_2 = T_2 - 273 = 377.5^\circ C$$

说明：需注意热流方向以及 T_2 必然低于 T_1 这一事实。

1.2 一幢混凝土墙壁的表面积 A 为30m²，厚度 L 为0.30m，用该墙壁将室内的暖空气与外界的冷空气隔开。已知墙壁的内表面温度 T_1 是25°C、外表面温度 T_2 为-15°C，混凝土的导热系数 k 为1W/(m·K)。

a) 参照方程式 (1.1)，描述使墙壁温度呈线性分布（如图所示）所需满足的条件；

b) 透过墙壁的热损失是多少？

解

简图：

假设：

- (1) 沿 x 方向的一维热传导；

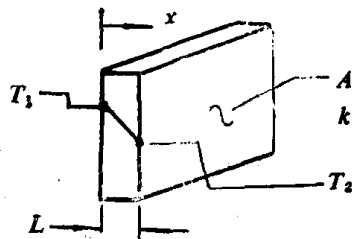


图 1-2

① 本《习题详解》所引用方程式、图表、数据等均取自原书（《传热基础》）。因全书各题中均有引用，故以后均不再注明“原书”二字。 — 编者

(2) 稳态状况;

(3) 常物性。

分析:

(1) 由方程式 (1.1) 可以明显地看出, 如果 q''_x 和 k 都是常数, 则 $dT/dx = -q''_x/k$ 也为常数, 因而温度分布为线性。在一维稳态状况下, 热流密度必然为常数; 并且, 假如 k 仅是温度的弱函数的话, 则它也近似为常数;

(2) 由方程式 (1.2)

$$q''_x = k \frac{T_1 - T_2}{L} = 1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \frac{25^\circ\text{C} - (-15^\circ\text{C})}{0.30\text{m}} = 133.3 \text{W/m}^2$$

因此

$$q_x = q''_x \cdot A = 133.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 30\text{m}^2 = 4000\text{W}$$

说明: 如果不存在稳态状况及/或 k 为常数的条件, 则平壁内的温度分布将是非线性的。

1.3 已知穿过木板的热流密度 q'' 是 40W/m^2 , 该木板厚 L 为 50mm , 内、外表面温度分别为 $T_1 = 40^\circ\text{C}$ 和 $T_2 = 20^\circ\text{C}$, 求木头的导热系数 k 。

解

简图:

假设:

(1) 一维热传导;

(2) 稳态状况;

(3) 常物性。

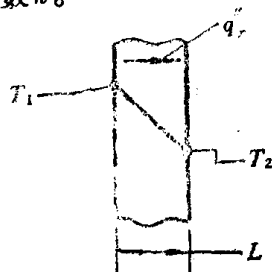


图 1-3

分析: 根据上述假设, 可用方程式

(1.2) 求出导热系数。整理后得

$$k = q'' \frac{L}{T_1 - T_2} = 40 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \frac{0.05\text{m}}{(40 - 20)^\circ\text{C}} = 0.10 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

说明: 求温差时, 温度单位 $^\circ\text{C}$ 或 K 均可以使用。

1.4 窗玻璃厚度 L 为 5mm , 其内、外表面温度分别为 $T_1 = 15^\circ\text{C}$ 和 $T_2 = 5^\circ\text{C}$ 。窗子的尺寸为 $1\text{m} \times 3\text{m}$, 玻璃的导热系数 k 为 $1.4\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

试求穿过玻璃窗的热流损失。

解

简图:

假设:

(1) 沿 x 方向的一维热传导;

(2) 稳态状况;

(3) 常物性。

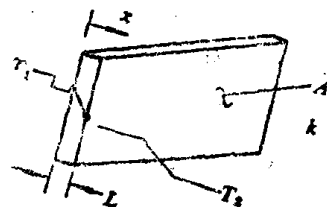


图 1-4

分析: 基于上述假设, 可用方程式 (1.2) 求出热流密度, 即

$$q''_x = k \frac{T_1 - T_2}{L} = 1.4 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \frac{(15 - 5)^\circ\text{C}}{0.005\text{m}} = 2800 \text{W/m}^2$$

由于整个表面上的热流密度是均匀的, 所以热流损失为

$$q = q'' \cdot A = 2800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 3\text{m}^2 = 8400\text{W}$$

说明：对于给定状况，玻璃内部的温度分布呈线性。

1.5 一温度 T_s 为 40°C 的物体表面与温度 T_∞ 为 20°C 的周围空气进行对流换热，换热系数 h 为 $20\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。试求通过对流换热从单位面积平面上所带走的热流是多少。

解

简图：

假设：稳态状况。

分析：方程式(1.3)是适用于给定状况的热流方程，即

$$q''_{\text{conv}} = h(T_s - T_\infty)$$

代入数值得

$$\begin{aligned} q''_{\text{conv}} &= 20\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})(40 - 20)^\circ\text{C} \\ &= 400\text{W}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

说明：

(1) 由于 $T_s > T_\infty$ ，所以热流方向是由表面向外的；

(2) 试考虑一下，为什么对流换热系数 h 的温度单位为K(开尔文温标)，而 $(T_s - T_\infty)$ 的温度单位为摄氏温标 $^\circ\text{C}$ 。

1.6 温度 T_∞ 为 300°C 的空气从长 0.5m 、宽 0.25m 的平板上流过。若对流换热系数 h 为 $250\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，而平板温度 T_s 保持为 40°C 时，求空气对所接触平板一侧的传热速率是多少？

解

简图：

假设：

(1) 稳态状况；

(2) 整个平板上的温度分布均匀；

(3) 整个平板的导热系数是均匀的。

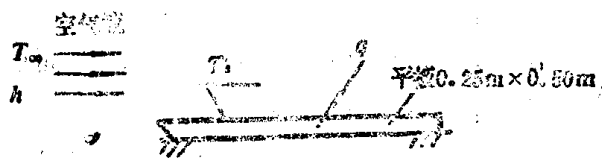


图 1-6

分析：空气流对平板的对流传热速率可用方程式(1.3)所表示的牛顿冷却定律求出。该方程写作如下形式：

$$q = q'' \cdot A = hA(T_\infty - T_s)$$

式中 A 为平板面积。代入数值则有

$$\begin{aligned} q &= 250 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}} (0.25 \times 0.50)\text{m}^2 \cdot (300 - 40)^\circ\text{C} \\ &= 8125\text{W} \end{aligned}$$

说明：需认识到，牛顿冷却定律对对流换热速率来说是包含着方向的。写成如上形式就意味着热流是由空气传向平板，亦即传热势为 $(T_\infty - T_s)$ 。

1.7 将一直径 D 为 10mm 、黑度 ε 为 0.9 的球体放在壁温 $T_{w,r}$ 为 400°C 的大型真空烘箱中。为使球的温度 T_s 保持为 80°C 而用水进行冷却，试求炉壁对球体的传热速率。

解

简图:

假设:

- (1) 箱壁完全包围球体;
- (2) 稳态状况;
- (3) 球表面温度和箱壁表面温度均匀;
- (4) 箱内抽真空且箱体比球体大得多。

分析: 只存在辐射一种传热方式时, 用方程式 (1.6) 表示的热流方程可写成如下形式:

$$q_{rad} = \varepsilon A_s \sigma (T_{s, s}^4 - T_{s, r}^4)$$

式中 $A_s = \pi D^2$ 为球的表面积。代入数值有

$$\begin{aligned} q_{rad} &= 0.9 \times \pi (10 \times 10^{-3})^2 \text{m}^2 \times 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} [(400 + 273)^4 - (80 + 273)^4] \text{K}^4 \\ &= 3.04 \text{W} \end{aligned}$$

说明:

- (1) 这个速率方程对计算一个小物体与完全包围它的大表面之间的净传热是很有用的。同时, “小物体与完全包围它的大表面” 实质上也是限制条件;
- (2) 要认识到, 净热流的方向取决于 $T_{s, s}$ 和 $T_{s, r}$ 的书写形式;
- (3) 在计算辐射传热时, 一定要采用开尔文 (K) 温度单位。

1.8 将一表面积 A 为 0.5m^2 、黑度 ε 为 0.8 、温度 T_s 等于 150°C 的物体置于壁温 $T_{s, r}$ 保持为 25°C 的大型真空舱中。求这个物体的表面辐射热交换速率是多少, 该物体表面与舱壁之间的净辐射热交换速率是多少?

解

简图:

假设: 被包围物体的表面积比舱壁面积小得多。

分析:

- (1) 由方程式 (1.5) 知该表面的辐射热交换速率为

$$\begin{aligned} q_{s, i, r} &= q_{s, i, r}'' \times A = \varepsilon A \sigma T_s^4 \\ &= 0.8 (0.5 \text{m}^2) 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} [(150 + 273) \text{K}]^4 \\ &= 726 \text{W} \end{aligned}$$

- (2) 由方程式 (1.6) 知, 物体表面与舱壁之间的净辐射热交换速率为

$$\begin{aligned} q &= \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{s, r}^4) \\ &= 0.8 \times (0.5 \text{m}^2) \times 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} [(423 \text{K})^4 - (298 \text{K})^4] \\ &= 547 \text{W} \end{aligned}$$

说明: 上面的结果表示了置于舱中的物体的表面在某一时刻的净热流损失。因此, 这个表面将由于损失热量而被冷却, 并且其温度乃至热流损失将随着时间的延续而下降。当物体表面温度降到与包围体一样时, 则达到了稳定状况。

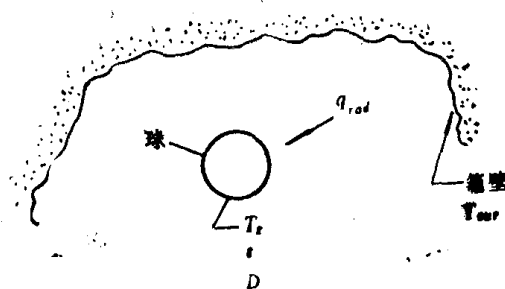


图 1-7

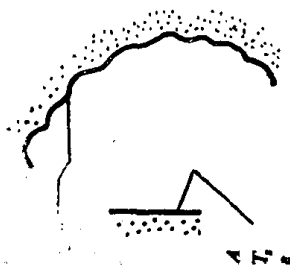


图 1-8

✓ 1.9 一座墙壁内部在非稳态过程(随时间变化)中的某个时刻 t_1 的温度分布如图简图所示。试问这座墙壁是在加热还是在被冷却?

解

简图:

假设:

- (1) 沿 x 方向的一维热传导;
- (2) 常物性;
- (3) 无内热生成。

分析: 对平壁的控制单元应用能量平衡方程式(1.10), 则有

$$q_{\text{cond},1} - q_{\text{cond},2} = \dot{E}_{st}$$

取 $\dot{E}_{st} = \rho V c (dT/dt)$, 然后由傅里叶定律计算出传导项。则

$$-kA(dT/dx)_1 - [-kA(dT/dx)_2] = \rho V c (dT/dt)$$

因此

$$\frac{dT}{dt} = \frac{kA}{\rho V c} \left[\left(\frac{dT}{dx} \right)_2 - \left(\frac{dT}{dx} \right)_1 \right]$$

由于位置1和位置2之间的温度梯度为负值, 且 $|dT/dx|_1 > |dT/dx|_2$, 所以知 dT/dt 为正值。因而知道墙壁在被加热。

说明: 壁内最终的(稳态)温度分布状况取决于加在两表面上的热状态的特征。

1.10 把一黑度为 ϵ 、开始处于高温的实心铝球放在舱中冷却。使冷气通过舱中循环, 以使舱壁保持较低温度。试推导出在冷却过程中铝的球温度随时间变化的方程式(不必解)。

解

简图:

假设:

- (1) 在任意时刻 t 的球体温度 T 都是均匀的;
- (2) 常物性;
- (3) 舱壁比球体大得多。

分析: 对球体的控制单元应用能量平衡定律, 则

$$\dot{E}_{st} = -\dot{E}_{out}$$

或

$$\frac{d}{dt}(\rho V c T) = -(q_{conv} + q_{rad})$$

根据方程式(1.3)和(1.6)知

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{A}{\rho V c} [h(T - T_{\infty}) + \epsilon \sigma (T^4 - T_{\infty}^4)]$$

或

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{6}{\rho c D} [h(T - T_{\infty}) + \epsilon \sigma (T^4 - T_{\infty}^4)]$$

说明:

- (1) 已知在 $t = 0$ 时刻 $T = T_i$ 。所以可用数字积分法解上述方程, 以求得 $T(t)$;

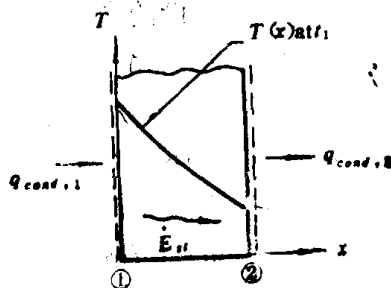


图 1-9

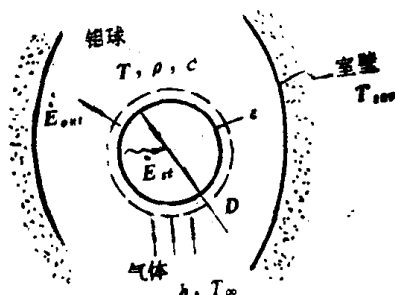


图 1-10

(2) 球体温度均匀这个假设的确切性取决于 h 、 D 和球体导热系数 k ，随 k 值的增大和 h 、 D 值的减小，假设的准确性会得到改善。

1.11 把一块4mm厚的铝板水平安放，其下表面被良好绝热。在铝板的上表面涂一层薄的特殊涂料，它能吸收入射阳光的80%，而黑度 $\varepsilon = 0.25$ 。已知铝的密度 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ ，比热 $c = 900 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

a) 若平板温度为 25°C ，其上表面突然暴露在温度 $T_\infty = 20^\circ\text{C}$ 的空气中，太阳辐照提供的热流密度为 900 W/m^2 ，上表面与空气之间的对流换热系数 $h = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ 时，求平板温度的起始变化速率；

b) 当达到稳态状况时，平板的平衡温度多高？

解

简图：

假设：

- (1) 端部效应可以忽略；
- (2) 在任意时刻的平板温度都是均匀的；
- (3) 常物性；
- (4) 底表面绝热；
- (5) 不计环境辐射；
- (6) 无内热生成。

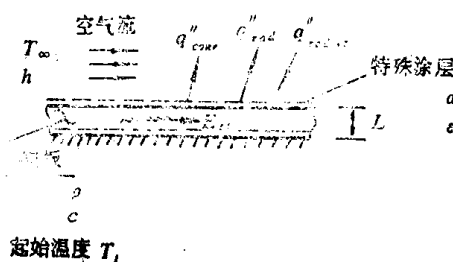


图 1-11

分析：

(1) 对平板的控制单元应用能量平衡方程式 (1.10)，则对单位表面积有

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st}$$

或

$$\alpha q''_{solar} (1\text{m}^2) - q''_{rad} (1\text{m}^2) - q''_{conv} (1\text{m}^2) = \frac{d}{dt} (McT) = \rho (1\text{m}^2 \times L) c \frac{dT}{dt}$$

整理上式并将方程式 (1.3) 和 (1.5) 代入。则

$$\frac{dT}{dt} = (1/\rho Lc) [\alpha q''_{solar} - \varepsilon \sigma T_i^4 - h(T_i - T_\infty)]$$

$$= \left(2700 \times \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.004\text{m} \times 900 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)^{-1}$$

$$\times \left[0.8 \times 900 \times \frac{\text{W}}{\text{m}^2} - 0.25 \times 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} (298\text{K})^4 - 20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} (25 - 20)^\circ\text{C} \right]$$

$$= 0.052^\circ\text{C/s}$$

(2) 在稳态状况下， $\dot{E}_{st} = 0$ 。所以能量平衡方程简化为

$$\alpha q''_{solar} = \varepsilon \sigma T^4 + h(T - T_\infty)$$

$$0.8 \left(900 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) = 0.25 \times 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \cdot T^4 + 20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} (T - 293)\text{K}$$

采用逐次逼近法求出

$$T \approx 321\text{K} = 48^\circ\text{C}$$

说明：要注意到，在第(2)部分必须用凯尔文温标表示温度。

1.12 在辐射流密度 $q'_{i, \text{amp}}$ 等于 2000 W/m^2 的红外灯照射下处理一平板上的镀层。镀层吸收入照辐射流的80%，而黑度 ϵ 为0.5。温度为 30°C 的包围面比这个平板大得多。平板表面与温度 T_∞ 为 20°C 的周围空气之间的对流换热系数 h 为 $15 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ ，试求平板温度。

解

简图：

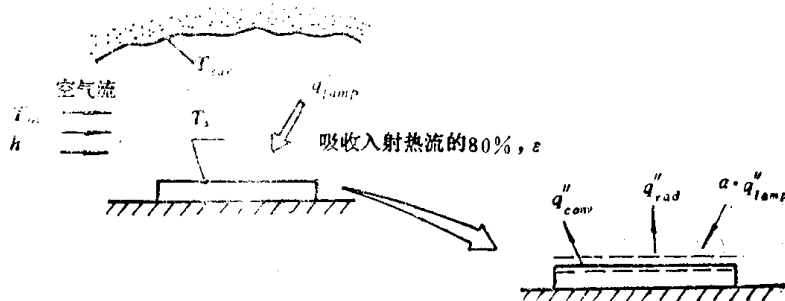


图 1-12

假设：

- (1) 稳态状况；
- (2) 平板与包围体相比为小物体；
- (3) 平板背面无热损失。

分析：按1.2.3节的方法，可列出平板上表面的能量平衡方程。根据方程式 (1.11) 有

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = 0$$

然后确定有关的传热方式，则平衡方程式变为

$$\alpha \times q'_{i, \text{amp}} - q''_{\text{conv}} - q''_{\text{rad}} = 0$$

符号 α 表示被平板吸收的红外灯入射热流 ($q'_{i, \text{amp}}$) 的分数。对 q''_{conv} 应用牛顿冷却定律方程 (1.3)，再对辐射换热项应用适当的热流方程 (1.6)，则有

$$\alpha \times q'_{i, \text{amp}} - h(T_s - T_\infty) - \epsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) = 0$$

然后代入数值

$$\begin{aligned} 0.8 \times 2000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} - 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} [T_s - (20 + 273)] \text{K} - 0.5 \\ \times 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} [T_s^4 - (30 + 273)^4] \text{K}^4 = 0 \end{aligned}$$

再进行逐次逼近，求得

$$T_s = 377 \text{ K}$$

1.13 一块金属板的背面完全绝热，其前面吸收的太阳辐射热流密度 $q'_{s, i}$ 为 800 W/m^2 。金属板与周围空气之间的对流换热系数 h 为 $12 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 。

a) 不计金属板与包围面之间的辐射换热，并假定周围的空气温度 T_∞ 为 20°C ，试求平板在稳态状况下的温度；

b) 空气温度不变，若平板表面黑度 ϵ 为0.8，大包围面的温度也是 20°C 时，求平板温度。

解

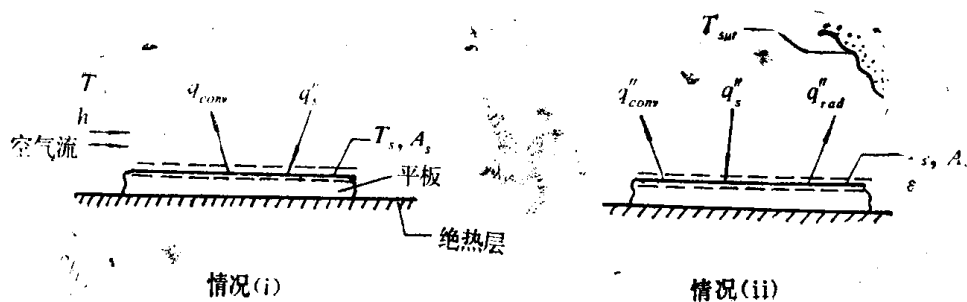


图 1-13

简图:

假设:

- (1) 稳态状况;
- (2) 平板背面无热损失;
- (3) 包围体比平板大得多。

分析:

(1) 应用能量平衡关系, 确定简图所示情况 (1) 所表示的控制面。根据方程式 (1.11), 则能量守恒方程为

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = 0$$

相关过程包括平板与空气间的对流换热 q''_{conv} 和平板吸收的太阳辐射流密度 q''_s 。设若平板的面积为 A_s , 则能量守恒方程具有如下形式:

$$q''_s \cdot A_s - h A_s (T_s - T_\infty) = 0$$

解出 T_s , 即

$$\begin{aligned} T_s &= T_\infty + q''_s / h \\ &= 20^\circ\text{C} + \frac{800\text{W}/\text{m}^2}{12\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})} = 20^\circ\text{C} + 66.7^\circ\text{C} \approx 87^\circ\text{C} \end{aligned}$$

(2) 现在考虑平板与包围体之间的辐射换热, 表面能量平衡方程的形式为

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = 0$$

$$q''_s \cdot A_s - q''_{conv} - q''_{rad} = 0$$

辐射换热项具有方程 (1.6) 表达的形式, 因而能量平衡方程式为

$$q''_s \cdot A_s - h A_s (T_s - T_\infty) - \epsilon A_s \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) = 0$$

$$q''_s - h(T_s - T_\infty) - \epsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) = 0$$

采用绝对温标 (K), 并代入数值

$$\begin{aligned} 800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} - 12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} [T_s - (20 + 273)\text{K}] - 0.8 \times 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} [T_s^4 - (20 + 273)^4 \text{K}^4] \\ = 0 \end{aligned}$$

或

$$12T_s + 4.536 \times 10^{-8} T_s^4 = 4650.3$$

采用逐次逼近法, 求得

$$T_s = 338\text{K} = 65^\circ\text{C}$$

说明: 由于考虑了辐射换热, 所以如所预料的那样, T_s 下降了; 还应注意, 遵循牛顿冷却定律的对流换热也同时在进行。由于 $q''_{s, \dots}$ 是离开控制面的, 所以速率方程的形式必

然是 $h(T_s - T_\infty)$ ，而不是 $h(T_\infty - T_s)$ 。

1.14 已知穿过平壁到达一表面的导热热流密度 q''_{cond} 是 400 W/m^2 ，试求在下述各种状况下的表面温度

a) 该表面与温度为 20°C 的气流进行对流换热，其对流换热系数 $h = 10 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ ；

b) 同样的对流换热过程并伴有该表面与冷包围面之间的辐射换热。冷面的温度 T_{sur} 为 -150°C ，辐射换热系数 h_r 为 $5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 。

解

简图：

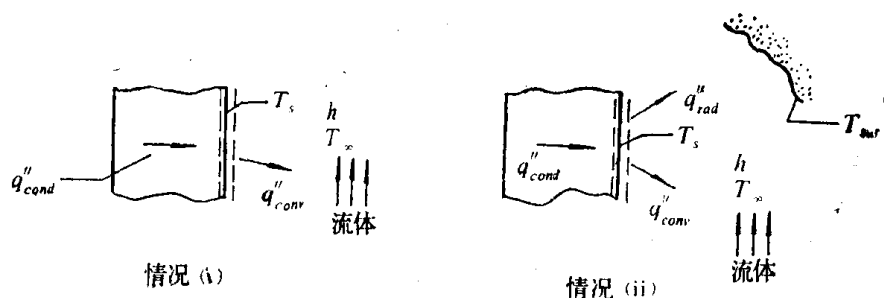


图 1-14

假设：

- (1) 稳态状况；
- (2) 无内热生成的一维热传导；
- (3) 在两种情况下透过平壁的热流密度相同。

分析：

(1) 应用牛顿冷却定律，可以用对流换热的热流密度项表示表面温度 T_s 。

$$q''_{cond} = h(T_s - T_\infty)$$

或

$$T_s = T_\infty + q''_{cond}/h$$

将方程式 (1.11) 做为单位表面积的能量平衡方程式，则有

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = 0 \quad \text{或} \quad q''_{cond} - q''_{conv} = 0$$

由于 q''_{cond} 已知，所以

$$T_s = T_\infty + \frac{q''_{cond}}{h} = 20^\circ\text{C} + \frac{400 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}} = 20^\circ\text{C} + 40^\circ\text{C} = 60^\circ\text{C}$$

(2) 现在考虑温度为 T_s 的表面和温度为 T_{sur} 的包围面之间的辐射换热。其表面能量平衡方程为

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = 0 \quad \text{或} \quad q''_{cond} - q''_{conv} - q''_{rad} = 0$$

对辐射热流方程式采用线性化的形式 (方程式1.7)，则平衡方程的表达式为

$$q''_{cond} - h(T_s - T_\infty) - h_r(T_s - T_{sur}) = 0$$

解出 T_s ，则

$$T_s = -\frac{hT_\infty + h_r T_{sur}}{h + h_r} + \frac{q''_{cond}}{h + h_r}$$

$$= \frac{10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \times 20^\circ \text{C} + 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \times (-150^\circ \text{C})}{(10 + 5) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})} + \frac{400 \text{ W}/\text{m}^2}{(10 + 5) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})} = -10^\circ \text{C}$$

说明：在第(2)种情况下， q''_{cond} 是传入表面。

1.15 一绝热层的厚度 L 为25mm、导热系数 k 为 $0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，用这个绝热层将一温度为 400°C 的表面与一股空气流隔开。若空气温度 T_∞ 为 35°C ，空气与绝热层外表面之间的对流换热系数 h 为 $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，求绝热层外表面的温度。

解

简图：

假设：

- (1) 稳态状况；
- (2) 绝热层内为一维热传导；
- (3) 忽略外表面与包围面之间的辐射换热。

分析：根据外表面的能量平衡关系

$$q''_{cond} = q''_{conv}$$

或者，根据方程式(1.2)和(1.3)

$$k \frac{(T_1 - T_2)}{L} = h(T_2 - T_\infty)$$

所以

$$T_2 = \frac{\frac{k}{L} T_1 + h T_\infty}{h + \frac{k}{L}} = \frac{\frac{0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})}{0.025 \text{ m}} (400^\circ \text{C}) + 500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} (35^\circ \text{C})}{500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})}{0.025}} = 37.9^\circ \text{C}$$

说明：如果包围面的温度与空气的温度相近，由于 T_2 值很小，所以外表面和包围面之间的辐射换热可以忽略。在这种情况下，对流换热方式对外表面的传热过程起主导作用，因而假设(3)是精确的。

1.16 为了求出空气流过一厚的钢铸件表面时的对流换热系数，沿着与铸件表面垂直的法线方向，在铸件内部距表面10mm和20mm处，安装热电偶进行实验。钢的导热系数 k 为 $15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；当空气温度 T_∞ 为 100°C 时，热电偶所测得的钢铸件内部的温度值分别为 50°C 和 40°C 。试求对流换热系数 h 多大。

解

简图：

假设：

- (1) 稳态状况；
- (2) 沿 x 方向的一维热传导；
- (3) 常物性；
- (4) 忽略生成内热。

分析：根据表面能量平衡方程(1.11)有

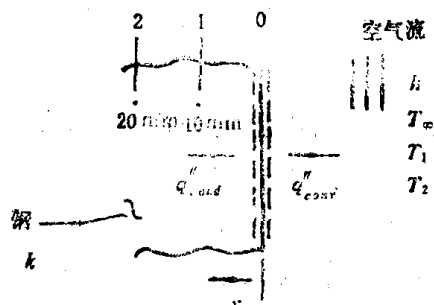


图 1-16

$$E''_{\text{辐射}} = E''_{\text{吸收}}$$

式中

$$q''_{\text{辐射}} = h(T_{\infty} - T_0)$$

而 $q''_{\text{辐射}}$ 可根据给定位置1和2处的温度求得。即由牛顿冷却定律(方程式1.2)有

$$q''_{\text{辐射}} = h \frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1} = 15 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \frac{(50 - 40)^{\circ}\text{C}}{(20 - 10) \times 10^{-3} \text{m}} = 15000 \text{W/m}^2$$

对于给定条件,铸件内部的温度梯度必然呈线性分布。所以

$$T_0 = 60^{\circ}\text{C}$$

因此

$$h = \frac{q''_{\text{辐射}}}{T_{\infty} - T_0} = \frac{15000 \text{W/m}^2}{40^{\circ}\text{C}} = 375 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

说明:用这种方法所测得的 h 值的精度在很大程度上取决于所做假设条件的确切性。

1.17 使空气流过温度为 600°C 的玻璃板的表面来冷却玻璃,对流换热系数 $h = 5 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。为了防止玻璃破裂,已知在冷却过程中,玻璃内部任何一点的温度梯度都不得超过 $15^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ 。若玻璃的导热系数 k 为 $1.4 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,表面黑度 ε 为 0.8 ,试问可以用来冷却玻璃的最低的起始温度多高?

解

简图:

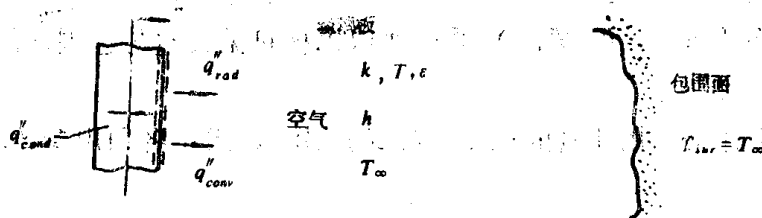


图 1-17

假设:

- (1) 玻璃板表面与温度 $T_{\text{sur}} = T_{\infty}$ 的大包围面之间进行辐射换热;
- (2) 沿 x 方向的一维热传导。

分析:最大温度梯度将出现在玻璃表面和冷却开始瞬间。根据表面的能量平衡方程(1.11)和热流方程(1.1)、(1.3)和(1.6)有

$$-k \frac{dT}{dx} - h(T_s - T_{\infty}) - \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) = 0$$

或者,取 $(dT/dx)_{\text{max}} = -15^{\circ}\text{C}/\text{mm} = 15000^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 和 $T_{\text{sur}} = T_{\infty}$,则

$$-1.4 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \left(-15000 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}} \right) = 5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} (873 - T_{\infty}) \text{K} + 0.8 \times 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} [873^4 - T_{\infty}^4] \text{K}^4$$

可以用逐次逼近法求出 T_{∞} 。并且,对 $T_{\infty} = 618 \text{K}$ 时,则

$$21000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \approx 1275 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 19730 \text{W/m}^2$$

因此, 最低允许空气温度为

$$T_{\infty} \approx 618\text{K} = 345^{\circ}\text{C}$$

说明:

(1) 开始阶段, 冷却过程主要由辐射效应决定;

(2) 对于 T_{∞} 固定的情况, 进入冷却过程之后, 表面的温度梯度将随时间的延续而下降。因此, T_{∞} 会随时间的延续而下降, 并且仍保持在最大允许温度梯度之内。

1.18 试考虑一平板式太阳能搜集器的稳态工作状态 (如图1-18a所示), 太阳对每单位面积搜集器的辐射热流为 $q_s' (\text{W/m}^2)$ 。辐射热流可以全部透过玻璃罩板, 而涂黑的吸热板所能吸收的辐射分量的设计值为 α (吸收率)。可以认为, 没有被吸热板吸收的辐射分量 $(1-\alpha)$ 又通过罩板反射到大气和空间中去了。使工质流过焊接在吸热板下面的铜管, 以便从搜集器获得有用能量。将铜管盘成螺旋形, 令比热为 c_p 的流体以恒定流率 $\dot{m}$ 通过盘管被加热。这样, 工质的温度就由入口时的 T_i 升高到出口时的 T_o 。尽管可以假定搜集器底部被完全绝热 (无热损失); 但由于气垫空间的对流换热作用及吸热板与罩板之间的辐射换热作用, 在吸热板那里还是存在热损失的。假设吸热板和罩板分别处于均匀温度 T_a 和 T_g , 则同时存在的对流换热热流和辐射换热热流可分别表示为 $h_a(T_a - T_o)$ 和 $h_{r,ag}(T_a - T_o)$ 。 h_a 是与气垫空间有关的对流换热系数; 而 $h_{r,ag}$ 是与“吸热板-罩板”组合体有关的辐射换热系数。玻璃罩板与周围空气之间也通过对流方式传出热流 $h_o(T_g - T_o)$, 并且和包围面之间以辐射方式交换能量 $h_{r,og}(T_g - T_{\infty})$ 。通过玻璃罩板可见天空与包围面的有效温度 T_{∞} , 一般都低于周围空气的温度。

a) 试写出工质捕集有用能量的速率方程式 $q_u(W)$, 式中各项用参数 $\dot{m}$ 、 c_p 、 T_i 和 T_o 表示之;

b) 列出吸热板的能量平衡关系式; 利用该式求出关于 q_u 的方程, 方程中各项用 q_s' 、 α 、 T_a 、 T_o 、 h_a 、 $h_{r,ag}$ 和 A 表示;

c) 列出罩板的能量平衡式;

d) 列出与整个搜集器控制体系有关的总能量平衡式; 并把该平衡式与 b) 和 c) 所求的结果进行比较;

e) 我们把捕集到的有用热能与太阳对搜集器入射能量的速率之比定义为搜集器的有效系数 η , 试写出 η 的表达式;

f) 试叙述工质流率 $\dot{m}$ 对 T_a 、 T_o 和 η 各量有什么影响; 如果移去罩板, T_a 将如何变化?

解

简图: 如图1-18b所示。

假设:

- (1) 稳态状况;
- (2) 均匀的表面温度;
- (3) 罩板对太阳辐射是完全透明的, 但对从包围体和吸热板来的辐射是不透明的;
- (4) 底部绝热;
- (5) 忽略边界热损失。

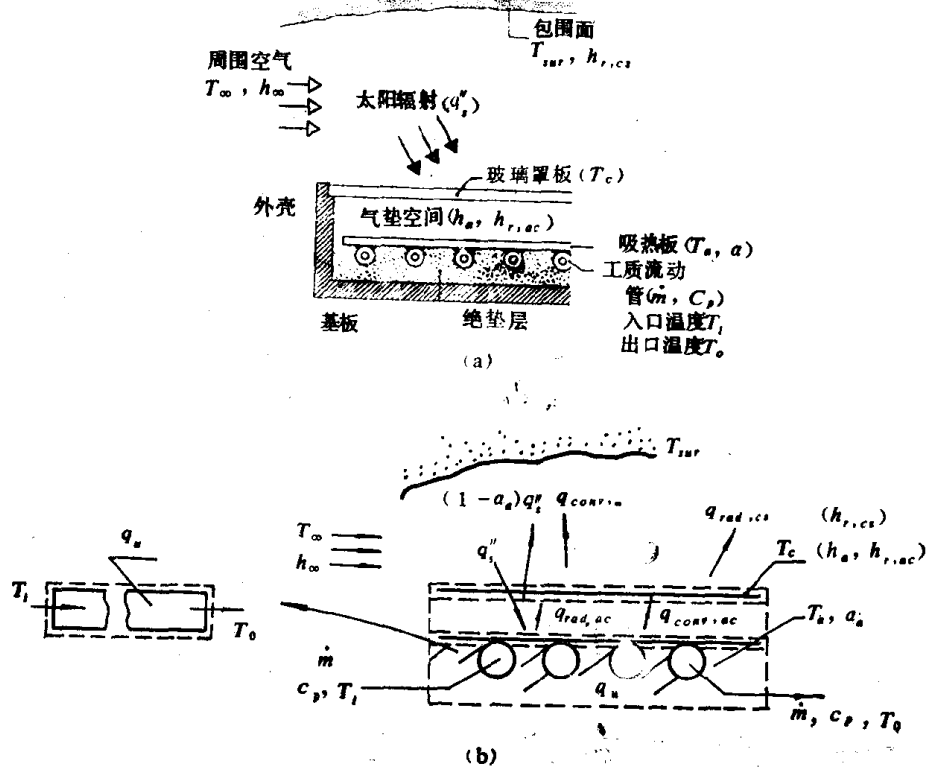


图 1-18

分析:

(1) 列出管路控制单元的能量平衡式, 则有

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = 0$$

或

$$q_u + m c_p (T_i - T_{ref}) - m c_p (T_o - T_{ref}) = 0$$

式中 T_{ref} 为热力参考温度。因此,

$$q_u = m c_p (T_o - T_i) \quad (1)$$

(2) 根据吸热的能量平衡方程

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = 0$$

或

$$\alpha_a q''_s A - q_{rad,ac} - q_{conv,ac} - q_u = 0$$

因此

$$q_u = [\alpha_a q''_s - h_{r,ac}(T_a - T_o) - h_a(T_a - T_o)] A \quad (2)$$

(3) 由罩板的能量平衡方程有

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = 0$$

$$q_{rad,ac} + q_{conv,ac} - q_{rad,cs} - q_{conv,cs} = 0$$

或

$$h_{r,ac}(T_a - T_o) + h_a(T_a - T_o) - h_{r,cs}(T_o - T_{sur}) - h_{cs}(T_o - T_{sur}) = 0 \quad (3)$$

式内各项中的捕集器面积已经约去。

(4) 对整个搜集器应用能量平衡关系, 有