

Fundamentals of Heat and Mass Transfer
Exercise Detailed Solution



传热和传质基本原理 习题详解

(原著第六版)

(Sixth Edition)

弗兰克 P. 英克鲁佩勒

F.P.Incropera

[美]

狄奥多尔 L. 伯格曼

T.L.Bergman

大卫 P. 德维特

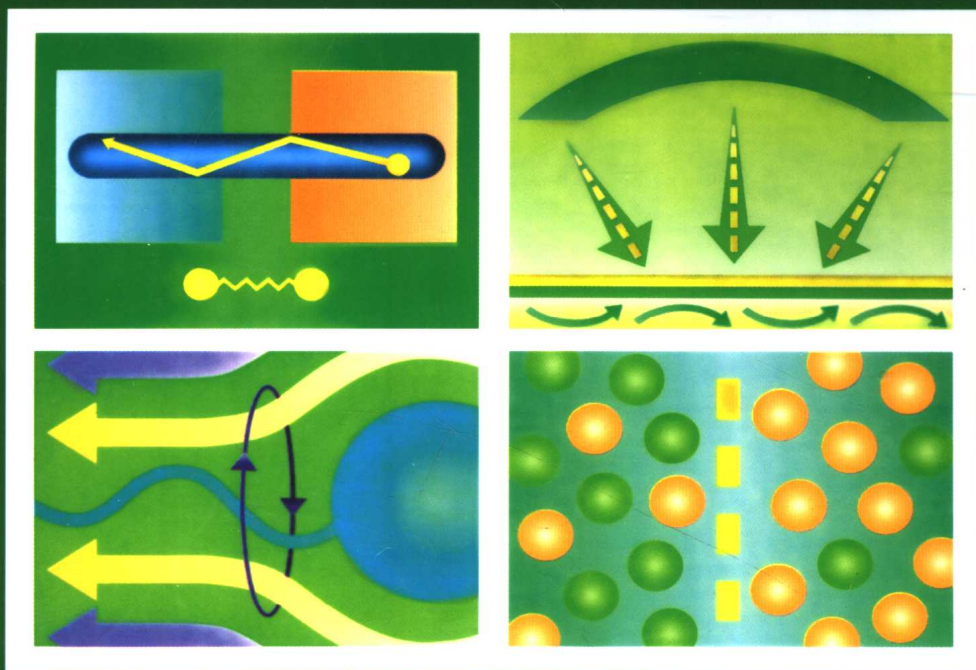
D.P.DeWitt

著

艾德丽安 S. 拉维恩

A.S.Lavine

叶宏 葛新石 徐斌 译



化学工业出版社

Fundamentals of Heat and Mass Transfer
Exercise Detailed Solution



传热和传质基本原理

习题详解

TK124/50A

2007

(原著第六版)

(Sixth Edition)

弗兰克 P. 英克鲁佩勒
F.P.Incropera

大卫 P. 德维特
D.P.DeWitt

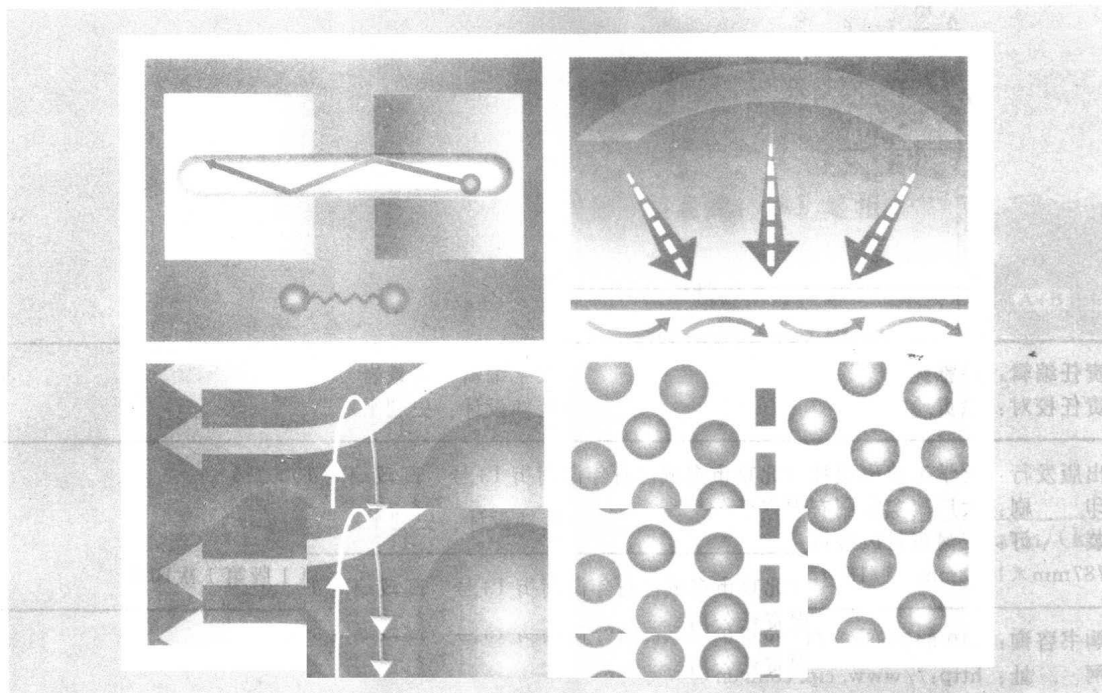
[美]

狄奥多尔 L. 伯格曼
T.L.Bergman

艾德丽安 S. 拉维恩
A.S.Lavine

著

叶宏 葛新石 徐斌 译



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

传热和传质基本原理习题详解：第6版/[美]英克鲁佩勒(Incropera, F. P.)等著；叶宏，葛新石，徐斌译.
北京：化学工业出版社，2007.6

书名原文：Fundamentals of Heat and Mass Transfer
Exercise Detailed Solution

ISBN 978-7-122-00762-9

I. 传… II. ①英…②叶…③葛…④徐… III. 传热
传质学-解题 IV. TK124-44

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第103030号

Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th edition, by Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S.,

ISBN 0-471-45728-0

Copyright © 2007 John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITION PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS, New York, Chichester, Brisbane, Singapore and Toronto. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

本书中文简体字版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权化学工业出版社独家出版发行。未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号：01-2006-6465

责任编辑：徐雅妮

文字编辑：咎景岩

责任校对：徐贞珍

装帧设计：史利平

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）

印刷：大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订：三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张27 字数764千字 2007年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：45.00元

版权所有 违者必究

译者序

本书是与《传热和传质基本原理》(第六版)一书配套的习题解,是根据该书原著者的手稿翻译而成的。原稿有1421道习题,限于篇幅,中译本只给出了原书约1/5的习题解。为与教材中的习题号对应,本书中的习题号没有顺排。

这些习题是作者在长期的教学和科研实践中积累的精华,内容非常丰富,且与实际应用紧密联系,是原教材极好的补充。本书中对每道习题都按原教材中建议采用的规范步骤给出了详细解题过程,是相关专业本科生和研究生学习传热和传质学的重要辅导书,也是从事涉及传热和传质工作的广大科技工作者的实用参考书。

作为一本习题解,建议读者在使用时要谨慎,尽量不要依赖它。因为传热和传质学概念繁多,与实践关系紧密,为强化对基本概念的理解和提高解决实际问题的能力,必须亲历亲为,大量解题,本书内容可用于检查自己解题的结果。另外,本书中相当部分参数分析类型题目的解答涉及IHT和FEHT两个软件,由于需要单独购买,为减轻读者负担,本书没有配套。鉴于计算技术在传热和传质学中的重要地位,建议读者自行编写相关程序或使用较为通用的有限元分析软件求解这些题目,以达到训练的目的。

本书的翻译分工如下:第4~11章由叶宏翻译;第12~14章由葛新石翻译;第1~3章由徐斌翻译。译者相互校阅了译稿。

由于本书涉及的领域很广,限于译者水平,译文中难免会出现差错,恳请读者批评指正。

本书的出版得到中国科学技术大学工程科学学院、研究生院和教务处的支持,在此表示感谢。

叶宏 葛新石 徐斌

中国科学技术大学
热科学和能源工程系

2007年4月

目 录

第 1 章 导论	1
第 2 章 热传导引论	17
第 3 章 一维、稳态热传导	35
第 4 章 二维稳态导热	79
第 5 章 瞬态导热	104
第 6 章 对流导论	141
第 7 章 外部流动	156
第 8 章 内部流动	201
第 9 章 自然对流	246
第 10 章 沸腾和凝结	287
第 11 章 换热器	310
第 12 章 辐射：过程和性质	338
第 13 章 表面之间的辐射换热	374
第 14 章 扩散传质	415

第1章 导论

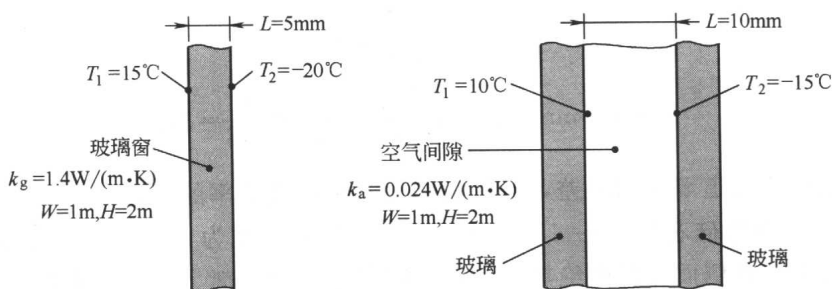
导热

1.2 一扇玻璃窗的宽和高分别为 $W=1\text{m}$ 和 $H=2\text{m}$, 厚为 5mm , 热导率^①为 $k_g=1.4\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。如果在一个寒冷的冬天, 玻璃的内外表面温度分别为 15°C 和 -20°C , 通过窗户的热损速率是多少? 为减少通过窗户的热损, 习惯上采用双层玻璃结构, 相邻的玻璃由空气间隙隔开。如果间隙厚为 10mm , 且与空气接触的玻璃表面的温度分别为 10°C 和 -15°C , 通过一个 $1\text{m}\times 2\text{m}$ 的窗户的热损速率是多少? 空气的热导率为 $k_a=0.024\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

已知: 单层窗以及双层窗空气间隙的宽度、高度、厚度和热导率; 冬季空气间隙两侧的玻璃表面的典型温度。

求: 通过单层窗以及双层窗的热损速率。

示意图:



假定: (1) 玻璃和空气中为一维导热; (2) 稳态; (3) 双层窗中所封闭的空气是静止的 (忽略浮升力引起的运动)。

分析: 根据傅里叶定律, 热损速率为

$$\text{单层} \quad q_g = k_g A \frac{T_1 - T_2}{L} = 1.4 \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}) (2\text{m}^2) \frac{35^\circ\text{C}}{0.005\text{m}} = 19600 \text{W}$$

$$\text{双层} \quad q_a = k_a A \frac{T_1 - T_2}{L} = 0.024 (2\text{m}^2) \frac{25^\circ\text{C}}{0.010\text{m}} = 120 \text{W}$$

说明: 即使将玻璃的厚度加倍, 使之与空气间隙的厚度相等, 单层窗的热损仍然很大, 是不可以接受的。双层窗结构的主要优点在于空气的热导率低 (比玻璃小约 60 倍)。对于固定的室外环境气温, 使用双层窗结构也会提高向着室内空气侧的玻璃的表面温度。

1.4 一个建筑墙体的热导率为 $0.75\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 如果要求通过它的热损速率为通过热导率和厚度分别为 $0.25\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 100mm 的复合结构墙体的 80% , 其厚度应为多少? 两种墙体处于相同的表面温差。

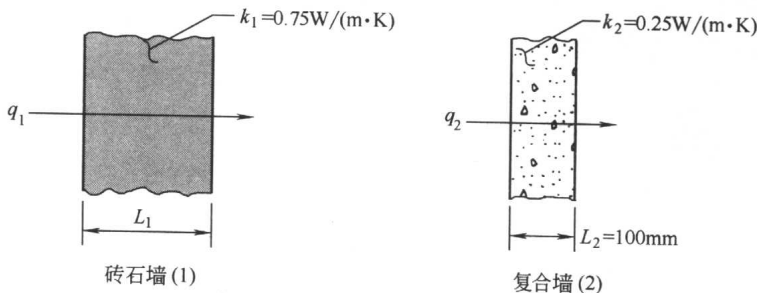
已知: 通过热导率已知的砖石墙体的传热速率为通过热导率和厚度给定的复合墙体的传热速率的 80% 。

求: 砖石墙体的厚度。

① 热导率也称导热系数。

2 传热和传质基本原理习题详解

示意图:



假定: (1) 两种墙体具有相同的表面温差; (2) 一维导热; (3) 稳态; (4) 物性为常数。
分析: 对于稳态条件, 可由傅里叶定律式(1.2) 得到通过一维墙体的导热热流密度

$$q'' = k \frac{\Delta T}{L}$$

式中, ΔT 表示表面温差。由于对两种墙体而言 ΔT 相同, 所以可得

$$L_1 = L_2 \frac{k_1}{k_2} \times \frac{q_2''}{q_1''}$$

用热流密度表示为

$$q_1'' = 0.8 q_2''$$

$$L_1 = 100 \text{mm} \times \frac{0.75 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})}{0.25 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})} \times \frac{1}{0.8} = 375 \text{mm}$$

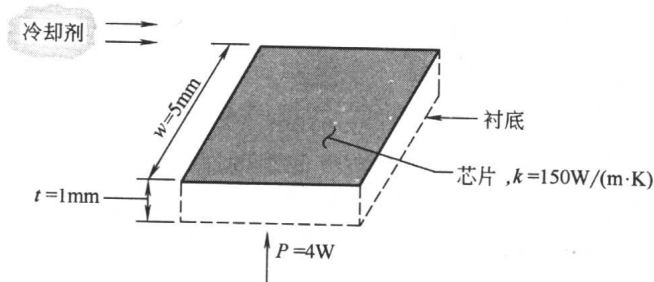
说明: 由于不知道墙体的温差, 所以我们得不到传热速率的值。

1.5 一个正方形硅芯片 [$k=150 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] 一侧的宽为 $w=5 \text{mm}$, 厚度为 $t=1 \text{mm}$ 。芯片安装在衬底上, 其侧面和背面绝热, 而正面则暴露于冷却剂。如果安装在芯片背面上的电路的功耗为 4W , 则背面与正面的稳态温差是多少?

已知: 芯片的外形尺寸和热导率; 一个表面上的功耗。

求: 芯片两侧的温差。

示意图:



假定: (1) 稳态; (2) 物性为常数; (3) 热耗散均匀; (4) 忽略背面和侧面的热损;
(5) 芯片内为一维导热。

分析: 芯片背面所有的电功耗以导热方式通过芯片传递。因此, 根据傅里叶定律

$$P = q = kA \frac{\Delta T}{t}$$

或

$$\Delta T = \frac{tP}{kw^2} = \frac{0.001 \text{m} \times 4 \text{W}}{150 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}) (0.005 \text{m})^2} = 1.1^\circ \text{C}$$

说明：对于固定的 P ，芯片两侧的温降随 k 和 W 的增加而减少，也随 t 的减少而减少。

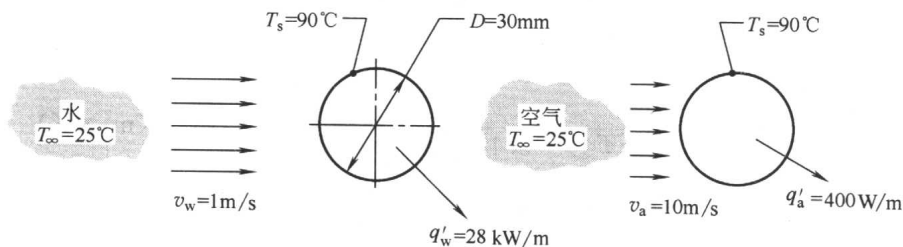
对流

1.7 在一根直径 30mm 的长圆柱体中埋设了电阻加热器。当温度为 25°C 的水以 1m/s 的速度横向流过圆柱体时，为使表面处于 90°C 的均匀温度所需单位长度功耗为 28kW/m。当同样处于 25°C 的空气以 10m/s 的速度横向流动时，保持相同表面温度所需单位长度上的功耗为 400W/m。计算并比较水和空气流动的对流系数。

已知：直径 30mm 的长圆柱体中埋设了电阻加热器；对于水流和空气流，为维持特定的表面温度所需的功率。

求：水流和空气流的对流过程各自的对流系数 h_w 和 h_a 。

示意图：



假定：横向绕流圆柱体，该圆柱体在与流动方向正交的方向上很长。

分析：离开单位长度圆柱体的传热速率具有如下形式

$$q' = h(\pi D)(T_s - T_\infty)$$

求解对流换热系数，得

$$h = \frac{q'}{\pi D(T_s - T_\infty)}$$

代入水和空气情况下的数值：

$$\text{水} \quad h_w = \frac{28 \times 10^3 \text{ W/m}}{\pi \times 0.030 \text{ m}(90 - 25)^\circ\text{C}} = 4570 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\text{空气} \quad h_a = \frac{400 \text{ W/m}}{\pi \times 0.030 \text{ m}(90 - 25)^\circ\text{C}} = 65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

说明：注意空气流速是水流的 10 倍，然而

$$h_w \approx 70h_a$$

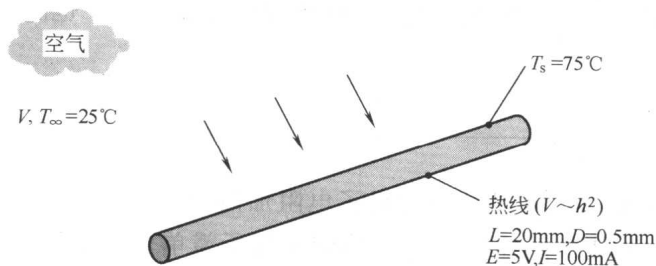
这些对流系数的值对液体和气体的受迫对流传热来说是典型的，见表 1.1。

1.8 在一种测量空气流速的常用方法中，要把一根电热丝（称为热线风速仪）插入气流中，丝的轴向与流动方向垂直。假定丝中消耗的电能通过受迫对流传给了空气。因此，对于给定的电功率，丝的温度取决于对流系数，而后者又取决于空气的速度。考虑一根长度和直径分别为 $L=20\text{mm}$ 和 $D=0.5\text{mm}$ 的丝，通过标定已知 $V=6.25 \times 10^{-5} h^2$ 。速度 V 和对流系数 h 的单位分别为 m/s 和 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。在一个应用中，空气温度为 $T_\infty=25^\circ\text{C}$ ，风速仪的表面温度保持为 $T_s=75^\circ\text{C}$ ，压降和电流分别为 5V 和 0.1A。空气的速度是多少？

已知：热线风速仪的长度、直径和标定刻度；空气流的温度；在一个特定应用中，丝上的电流、电压降和表面温度。

求：空气速度。

示意图:



假定: (1) 稳态, x 方向上的一维导热; (2) 忽略以自然对流或辐射方式离开丝的传热。

分析: 如果所有电能都通过对流传递给空气, 则一定满足下面的等式

$$P_{\text{elec}} = EI = hA(T_s - T_{\infty})$$

式中, $A = \pi DL = \pi(0.0005\text{m} \times 0.02\text{m}) = 3.14 \times 10^{-5} \text{m}^2$

因此

$$h = \frac{EI}{A(T_s - T_{\infty})} = \frac{5\text{V} \times 0.1\text{A}}{3.14 \times 10^{-5} \text{m}^2 (50^\circ\text{C})} = 318 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$V = 6.25 \times 10^{-5} h^2 = 6.25 \times 10^{-5} [318 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]^2 = 6.3 \text{m/s}$$

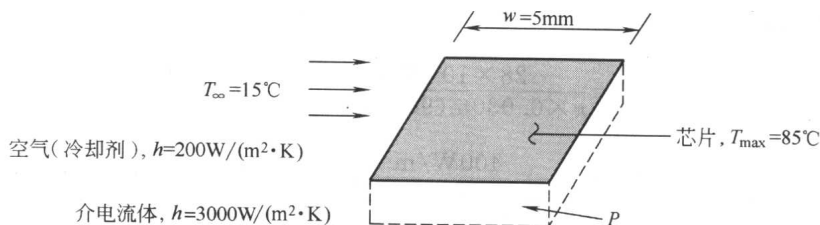
说明: 该对流换热系数很大, 可以忽略浮力(自然对流)和辐射的影响。

1.9 一个正方形等温芯片侧面的宽度为 $w = 5\text{mm}$, 芯片安装在衬底上, 周侧和背面隔热良好, 而正面则暴露于 $T_{\infty} = 15^\circ\text{C}$ 的流动的冷却剂中。基于可靠性考虑, 芯片的温度不能超过 $T = 85^\circ\text{C}$ 。如果冷却剂是空气且相应的对流系数为 $h = 200 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 最大允许的功耗是多少? 如果冷却剂是一种介电液体, $h = 3000 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 则最大允许的功耗是多少?

已知: 芯片宽度和最高允许的温度; 冷却剂条件。

求: 冷却剂为空气和液体时, 芯片最大允许的功耗。

示意图:



假定: (1) 稳态; (2) 忽略侧面和底部的传热; (3) 芯片处于均匀温度(等温); (4) 忽略辐射传热。

分析: 芯片中消耗的所有电能都通过对流传递给冷却剂。因此

$$P = q$$

根据牛顿冷却定律

$$P = hA(T - T_{\infty}) = hw^2(T - T_{\infty})$$

空气中

$$P_{\text{max}} = 200 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) (0.005\text{m})^2 (85 - 15)^\circ\text{C} = 0.35 \text{W}$$

介电液体中

$$P_{\text{max}} = 3000 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) (0.005\text{m})^2 (85 - 15)^\circ\text{C} = 5.25 \text{W}$$

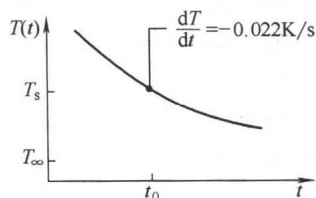
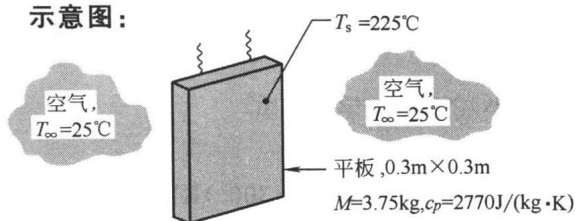
说明: 相对于液体, 空气是一种差的传热流体。因此, 在空气中芯片所能耗散的能量远少于在介电液体中的。

1.10 可以通过观察平板冷却过程中温度随时间的变化来确定垂直悬挂在静止空气中的热的薄平板的自然对流换热系数。假定平板是等温的，且可以忽略它与环境之间的辐射换热，计算平板温度为 225°C ，且平板温度随时间的变化 (dT/dt) 为 -0.022K/s 的时刻的对流系数。环境空气温度为 25°C ，平板的尺寸为 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$ ，质量和比热容分别为 3.75kg 和 $2770\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

已知：垂直悬挂在静止冷空气中的热平板；在平板温度为 225°C 的时刻，平板温度随时间的变化率。

求：该条件下的对流换热系数。

示意图：



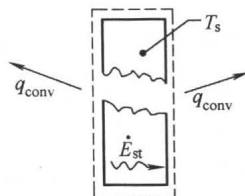
假定：(1) 平板等温；(2) 可以忽略与环境之间的辐射换热；(3) 可以忽略通过吊线的热损。

分析：如上面的冷却曲线所示，平板温度随时间而降低。感兴趣的是 t_0 时刻的情况。对一个围绕该板的控制表面，能量守恒要求是

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\text{in}} - \dot{E}_{\text{out}} &= \dot{E}_{\text{st}} \\ -2hA_s(T_s - T_{\infty}) &= Mc_p \frac{dT}{dt} \end{aligned}$$

式中， A_s 是平板一侧的表面积。求解 h ，得

$$\begin{aligned} h &= \frac{Mc_p}{2A_s(T_s - T_{\infty})} \left(\frac{-dT}{dt} \right) \\ &= \frac{3.75\text{kg} \times 2770\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})}{2 \times (0.3 \times 0.3)\text{m}^2 (225 - 25)\text{K}} \times 0.022\text{K/s} = 6.3\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned}$$



说明：(1) 假定平板高度抛光，发射率为 0.08 ，同对流作比较，确定是否可以忽略与处于 25°C 的环境之间的辐射换热。

(2) 我们将在后面考虑用于判断等温平板的假定是否合理的标准。如果平板的热导率很高 (例如铝或紫铜)，就可以满足该判据。

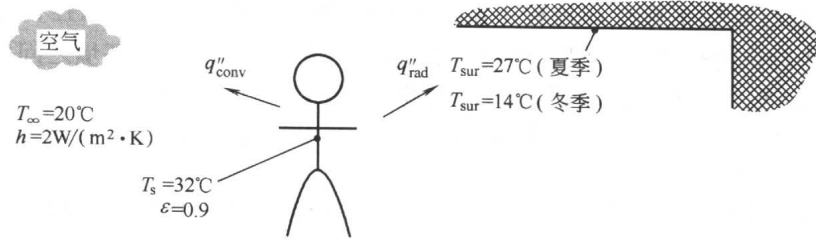
辐射

1.11 在用采暖或制冷系统维持相同室内温度的情况下，常见情形是人在冬季感觉有点冷，但在夏季却比较舒适。通过讨论以下房间 (通过计算) 为这种情况做出合理的解释：空气温度在全年维持在 20°C ，而房间的标称壁面温度在夏季和冬季则分别为 27°C 和 14°C 。可假定室内人体暴露表面的温度在全年均均为 32°C ，发射率为 0.90 。与人体和室内空气之间自然对流换热相关的系数约为 $2\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

已知：房间空气和壁面的温度；房间内人体表面的温度、对流系数和发射率。

求：夏季与冬季的舒适水平有差异的根据。

示意图:



假定: 可以近似认为人是处于很大的封闭腔体中的小物体。

分析: 热舒适与人体的散热有关, 而寒冷的感觉与热损过大相关联。由于房间空气的温度固定, 所以夏季和冬季的舒适水平不同不能归因于身体的对流散热。在两种情形中, 对流热流密度为:

$$\text{夏季和冬季} \quad q''_{\text{conv}} = h(T_s - T_\infty) = 2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \times 12^\circ\text{C} = 24 \text{ W}/\text{m}^2$$

但是, 辐射热流密度不同, 其值为:

$$\text{夏季} \quad q''_{\text{rad}} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) = 0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) (305^4 - 300^4) \text{ K}^4 = 28.3 \text{ W}/\text{m}^2$$

$$\text{冬季} \quad q''_{\text{rad}} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) = 0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) (305^4 - 287^4) \text{ K}^4 = 95.4 \text{ W}/\text{m}^2$$

冬季与夏季的辐射热流密度有显著差别, 因此感到寒冷是由于较冷的壁面对辐射的影响。

说明: 对于典型的表面积 $A = 1.5 \text{ m}^2$, 热损分别为 $q_{\text{conv}} = 36 \text{ W}$, $q_{\text{rad(夏季)}} = 42.5 \text{ W}$ 和 $q_{\text{rad(冬季)}} = 143.1 \text{ W}$ 。在冬天, 辐射热损很重要, 若其在 24h 内都维持这么高, 就会达到 2950kcal。

1.13 如果方程(1.9)中 $T_s \approx T_{\text{sur}}$, 辐射换热系数可近似为

$$h_{r,a} = 4\epsilon\sigma \bar{T}^3$$

其中 $\bar{T} \equiv (T_s + T_{\text{sur}}) / 2$ 。我们希望通过比较以下情形中的 h_r 和 $h_{r,a}$ 的值来评估这个近似的有效性。在每种情况下用图表示你的结果, 并说明该近似的有效性。

(a) 考虑一个抛光的铝 ($\epsilon = 0.05$) 或黑漆 ($\epsilon = 0.9$) 表面, 其温度可比环境温度 ($T_{\text{sur}} = 25^\circ\text{C}$) 高 $10 \sim 100^\circ\text{C}$ 。同时把你的结果和与空气 ($T_\infty = T_{\text{sur}}$) 中自然对流相关的系数值进行比较, 其中 $h[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] = 0.98\Delta T^{1/3}$ 。

(b) 考虑与把一个处于 $T_s = 25^\circ\text{C}$ 的工件放在壁面温度可在 $100^\circ\text{C} \leq T_{\text{sur}} \leq 1000^\circ\text{C}$ 范围内变化的大炉子中相关的初始条件。根据表面漆或涂层的种类, 其发射率值可为 0.05、0.2 和 0.9。对每一种发射率, 画出相对误差 $(h_r - h_{r,a})/h_r$ 与炉温的函数关系曲线。

已知: 线性化辐射传热系数的精确表达式和近似表达式, h_r 和 $h_{r,a}$ 。

求: (a) 当 $\epsilon = 0.05$ 和 0.9, 表面温度可比环境温度 ($T_{\text{sur}} = 25^\circ\text{C}$) 高 $10 \sim 100^\circ\text{C}$ 时, 比较这两个系数; 同时与自然对流系数作比较。(b) 当处于 $T_s = 25^\circ\text{C}$ 的工件的发射率为 $\epsilon = 0.05$, 0.2 及 0.9 时, 画出相对误差 $(h_r - h_{r,a})/h_r$ 与炉温的函数关系曲线。

假定: (1) 与工件相比, 炉壁很大; (2) 稳态。

分析: (a) 由辐射换热速率方程可得线性化的辐射传热系数 [式(1.9)]

$$h_r = \epsilon \sigma (T_s + T_{\text{sur}}) (T_s^2 + T_{\text{sur}}^2)$$

如果 $T_s \approx T_{\text{sur}}$, 则该系数可近似为更简单的表达式。

$$h_{r,a} = 4\epsilon\sigma \bar{T}^3 \quad \bar{T} = (T_s + T_{\text{sur}}) / 2$$

在 $\epsilon = 0.05$, $T_s = T_{\text{sur}} + 10 = 35^\circ\text{C} = 308\text{K}$ 及 $T_{\text{sur}} = 25^\circ\text{C} = 298\text{K}$ 的条件下, 得

$$h_r = 0.05 \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) (308 + 298) (308^2 + 298^2) \text{ K}^3 = 0.32 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad \blacktriangleleft$$

$$h_{r,a} = 4 \times 0.05 \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) [(308 + 298) / 2]^3 \text{ K}^3 = 0.32 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad \blacktriangleleft$$

当 $T_s = 35^\circ\text{C}$ 、 $T_\infty = T_{\text{sur}} = 25^\circ\text{C}$ 时, 自然对流系数

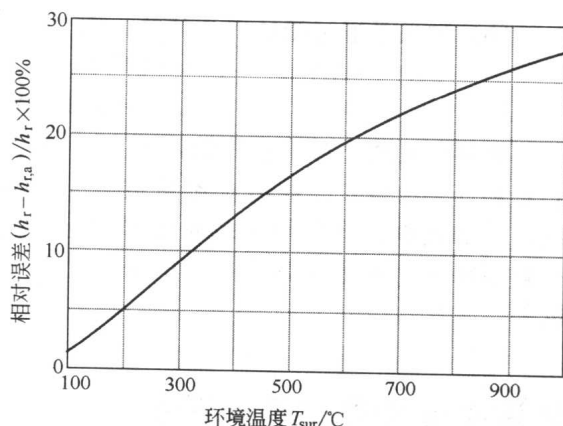
$$h = 0.98\Delta T^{1/3} = 0.98(T_s - T_\infty)^{1/3} = 0.98(308 - 298)^{1/3} = 2.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

当 $\epsilon = 0.05, 0.2$ 及 0.9 时, 在 $T_s - T_{\text{sur}} = 10 \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内, 这些系数的计算结果列表如下:

$T_s/^\circ\text{C}$	ϵ	系数/[W/(m ² ·K)]		
		h_r	$h_{r,a}$	h
35	0.05	0.32	0.32	2.1
	0.9	5.7	5.7	
135	0.05	0.51	0.50	4.7
	0.9	9.2	9.0	

在该范围内的表面和环境温度, 在中等发射率值下, 如 $\epsilon > 0.2$, 辐射和自然对流系数在数量级上是相当的。在这些条件下, 线性化的辐射传热系数的近似表示式的误差在 2% 以内。

(b) 将辐射系数 h_r 和 $h_{r,a}$ 的上述表达式用于 $T_s = 25^\circ\text{C}$ 的工件, 该工件放置在壁面温度可在 $100 \sim 1000^\circ\text{C}$ 范围内变化的炉中。相对误差 $(h_r - h_{r,a})/h_r$ 与表面发射率无关, 画出其与 T_{sur} 的函数关系。对于 $T_{\text{sur}} > 200^\circ\text{C}$, 由近似表达式得到的估计值的误差大于 5%。应谨慎地使用近似表达式, 并且该式仅适用于表面与环境之间的温差在 $50 \sim 100^\circ\text{C}$ 的范围之内的情况。



1.14 一些一侧边长为 $L = 15\text{mm}$ 的芯片安装在衬底上, 后者放置在一个壁面和空气温度均为 $T_{\text{sur}} = T_\infty = 25^\circ\text{C}$ 的腔体中。芯片的发射率为 $\epsilon = 0.60$, 最高允许的温度为 $T_s = 85^\circ\text{C}$ 。

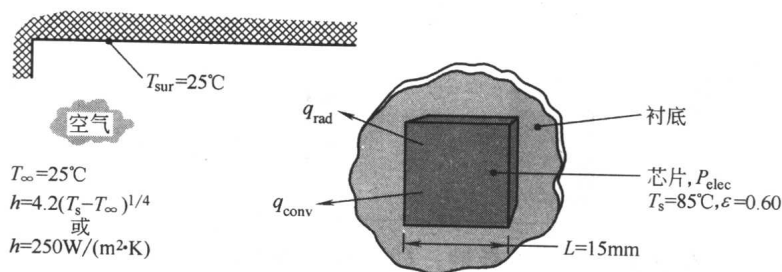
(a) 如果热量以辐射和自然对流的形式从芯片排出, 各芯片的最大运行功率是多少? 对流系数与芯片-空气温差有关, 可近似为 $h = C(T_s - T_\infty)^{1/4}$, 其中 $C = 4.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^{5/4})$ 。

(b) 如果采用风扇使空气流过腔体, 因而传热为受迫对流, $h = 250 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 最大运行功率是多少?

已知: 电子芯片的宽度、表面发射率和最高允许温度; 空气和环境的温度; 对流系数。

求: (a) 在 $h[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] = 4.2(T - T_\infty)^{1/4}$ 的自然对流条件下, 芯片的最大运行功率; (b) 在 $h = 250 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的受迫对流条件下, 芯片的最大运行功率。

示意图:



假定: (1) 稳态; (2) 小表面与大的周围环境之间的辐射换热; (3) 可以忽略芯片侧面的传热和芯片背面对衬底的导热。

分析: 根据上述假定条件, 芯片所消耗的电能必定与通过对流和辐射离开芯片的传热相平衡。因此, 由式(1.10)

$$P_{\text{elec}} = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} = hA(T_s - T_{\infty}) + \epsilon A \sigma (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4)$$

式中, $A = L^2 = (0.015\text{m})^2 = 2.25 \times 10^{-4} \text{m}^2$ 。

(a) 如果是通过自然对流传热, 则

$$q_{\text{conv}} = CA(T_s - T_{\infty})^{5/4} = 4.2 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^{5/4})(2.25 \times 10^{-4} \text{m}^2)(60\text{K})^{5/4} = 0.158 \text{W}$$

$$q_{\text{rad}} = 0.60(2.25 \times 10^{-4} \text{m}^2)5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)(358^4 - 298^4) \text{K}^4 = 0.065 \text{W}$$

$$P_{\text{elec}} = 0.158 \text{W} + 0.065 \text{W} = 0.223 \text{W}$$

(b) 如果是通过受迫对流传热, 则

$$q_{\text{conv}} = hA(T_s - T_{\infty}) = 250 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})(2.25 \times 10^{-4} \text{m}^2)(60\text{K}) = 3.375 \text{W}$$

$$P_{\text{elec}} = 3.375 \text{W} + 0.065 \text{W} = 3.44 \text{W}$$

说明: 显然, 对于芯片散热而言, 辐射和自然对流是效率很差的传热机制。对于 $T_s = 85^\circ\text{C}$ 和 $T_{\infty} = 25^\circ\text{C}$, 自然对流系数为 $11.7 \text{W}/\text{m}^2$ 。即使对于 $h = 250 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的受迫对流, 该功耗也比当今的许多处理器的运行功耗低很多。为提供足以满足需求的冷却, 常常有必要将芯片安置在高导热性的衬底上, 由于有离开背面的导热, 从而可提供额外的传热机制。

能量平衡和多传热模式效应

1.15 一个电阻与一个电池相连, 如图所示。在很短的瞬间之后, 电阻具有大致均匀的稳态温度, 95°C , 而电池和导线仍然处于 25°C 的环境温度。忽略导线的电阻。

(a) 把电阻作为一个系统并围绕其作控制表面, 则可应用方程(1.11c)。确定 \dot{E}_{in} (W)、 \dot{E}_{g} (W)、 \dot{E}_{out} (W) 和 \dot{E}_{st} (W) 的相应值。如果对整个系统作控制表面, \dot{E}_{in} 、 \dot{E}_{g} 、 \dot{E}_{out} 和 \dot{E}_{st} 的值各是多少?

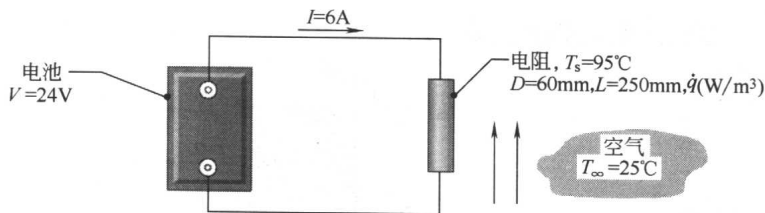
(b) 如果电能能在电阻中均匀地耗散, 而电阻是一个圆柱体, 直径和长度分别为 $D = 60\text{mm}$ 和 $L = 250\text{mm}$, 容积产热速率 \dot{q} (W/m^3) 是多少?

(c) 忽略电阻的辐射, 对流系数是多少?

已知: 电阻与一个在给定温度下运行的处于空气中的电池相连。

求: (a) 将电阻作为系统, 确定 \dot{E}_{in} (W)、 \dot{E}_{g} (W)、 \dot{E}_{out} (W) 和 \dot{E}_{st} (W) 的相应值。如果对整个系统作控制表面, 确定 \dot{E}_{in} 、 \dot{E}_{g} 、 \dot{E}_{out} 和 \dot{E}_{st} 的相应值。(b) 确定电阻内的容积产热速率 \dot{q} (W/m^3)。(c) 忽略电阻的辐射, 确定对流系数。

示意图:



假定: (1) 电能能在电阻中均匀地耗散; (2) 电阻温度均匀; (3) 可以忽略导线中耗散的电能; (4) 可以忽略电阻与环境之间的辐射换热; (5) 电池没有散热; (6) 电阻中为稳态条件。

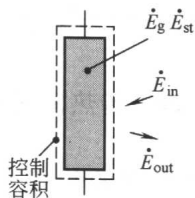
分析: (a) 参考 1.3.1 节, 在某一时刻, 控制容积的能量守恒条件, 式(1.11c) 为

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

式中, \dot{E}_{in} 、 \dot{E}_{out} 分别对应于表面流入和流出过程。能量产生项 \dot{E}_g 与其他的一些能量形式(化学能、电能、电磁能或核能)的转化有关。能量储存项 \dot{E}_{st} 与控制容积内物质的内能、动能和/或势能有关。 \dot{E}_g 、 \dot{E}_{st} 是容积现象。电池释放的电能为 $P=VI=24V \times 6A=144W$ 。

控制容积: 电阻。

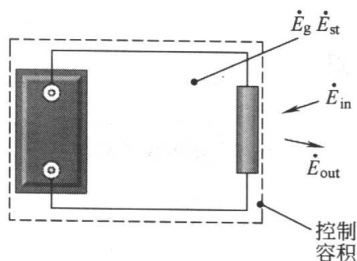
$$\begin{aligned} \dot{E}_{in} &= 0 & \dot{E}_{out} &= 144W \\ \dot{E}_g &= 144W & \dot{E}_{st} &= 0 \end{aligned}$$



式中, \dot{E}_g 项是电能转化成的热能; \dot{E}_{out} 项是电阻对空气的对流散热。

控制容积: 电池-电阻系统。

$$\begin{aligned} \dot{E}_{in} &= 0 & \dot{E}_{out} &= 144W \\ \dot{E}_g &= 144W & \dot{E}_{st} &= 0 \end{aligned}$$



由于我们考虑的是热能和机械能守恒, 电池中化学能转化为电能与所讨论的问题不相关, 控制容积内的电池不改变热能和机械能项。

(b) 根据体积为 $V = (\pi D^2/4)L$ 的电阻的能量平衡关系,

$$\dot{E}_g = \dot{q} V \quad 144W = \dot{q} [\pi(0.06m)^2/4] \times 0.25m \quad \dot{q} = 2.04 \times 10^5 W/m^3$$

(c) 根据电阻的能量平衡关系和牛顿冷却定律, 以及 $A_s = \pi DL + 2(\pi D^2/4)$, 有

$$\begin{aligned} \dot{E}_{out} &= q_{cv} = hA_s(T_s - T_\infty) \\ 144W &= h[\pi \times 0.06m \times 0.25m + 2(\pi \times 0.06^2 m^2/4)](95 - 25)^\circ C \\ &= h[0.0471 + 0.0057]m^2(95 - 25)^\circ C \\ h &= 39.0 W/(m^2 \cdot K) \end{aligned}$$

说明: (1) 在使用能量守恒要求 [式(1.11c)] 时, 要认识到 \dot{E}_{in} 和 \dot{E}_{out} 总是表示表面过程, 而 \dot{E}_g 和 \dot{E}_{st} 表示容积过程, 记住这一点很重要。能量产生项 \dot{E}_g 与从某种能量形式转化为热能的过程相关。能量储存项 \dot{E}_{st} 表示内能、动能和势能的变化速率。

(2) 由表 1.1 以及在 (c) 部分中确定的对流系数的量级, 我们可以得出结论: 电阻发生的是受迫对流, 而非自然对流。

1.17 退火是加工半导体材料的重要步骤, 可以通过在短时间内把硅片迅速加热到高温来实现。在图示的方法中采用了一块在高温 T_h 下运行的热平板。初始温度为 $T_{w,i}$ 的硅片被突然放置在与热板间距为 L 的位置处。分析的目的在于比较通过间隙中气体的导热和热板与冷的硅片之间的辐射换热的热流密度。同时也对硅片在初始时刻的温度变化速率 $(dT_w/dt)_i$ 感兴趣。热板和冷的硅片的表面可近似为黑体, 且假定它们的直径 D 远大于间距 L , 辐射热流密度可

表示成 $q''_{\text{rad}} = \sigma(T_h^4 - T_w^4)$ 。硅片的厚度为 $d = 0.78\text{mm}$ ，密度为 2700kg/m^3 ，比热容为 $875\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。间隙中气体的热导率为 $0.0436\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

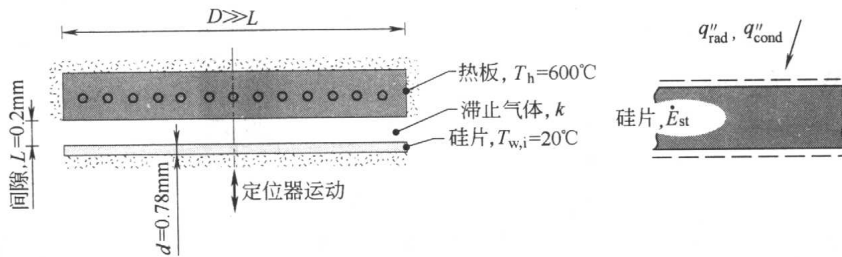
(a) 对于 $T_h = 600^\circ\text{C}$ 和 $T_{w,i} = 20^\circ\text{C}$ 的情况，计算辐射热流密度以及穿过 $L = 0.2\text{mm}$ 的间隙的导热热流密度。同时确定由以上两种加热方式各自导致的 $(dT_w/dt)_i$ 的值。

(b) 在间距为 0.2mm 、 0.5mm 和 1.0mm 时，在 $300^\circ\text{C} \leq T_h \leq 1300^\circ\text{C}$ 范围内确定这些热流密度和温度随时间的变化速率与热板温度的函数关系。用图表示你的结果。说明两种传热模式的相对重要性以及间距对加热过程的影响。在什么情况下可以将硅片在 10s 以内加热到 900°C ？

已知：基于以下传热模式的热板型硅片热处理工具：通过间隙中气体的导热以及穿过间隙的辐射换热。

求：(a) 在指定的热板和硅片温度以及间隙距离下，穿过间隙的辐射和导热热流密度；对于每种模式，初始时刻硅片温度的变化速率。(b) 在间距为 0.2mm 、 0.5mm 和 1.0mm 时，在 $300^\circ\text{C} \leq T_h \leq 1300^\circ\text{C}$ 范围内的热流密度和初始的温度-时间变化。说明两种传热模式的相对重要性以及间距的影响。在什么情况下可以将硅片在 10s 以内加热到 900°C ？

示意图：



假定：(1) 计算热流密度时考虑稳态条件；(2) 热板和硅片的直径比间隙的厚度大很多；(3) 通过气体的导热是一维的；(4) 热板和硅片都是黑体；(5) 可以忽略硅片背面的热损；(6) 在加热开始时硅片温度均匀。

物性：硅片： $\rho = 2700\text{kg/m}^3$ ， $c = 875\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；间隙中的气体： $k = 0.0436\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

分析：(a) $T_h = 600^\circ\text{C}$ 和 $T_w = 20^\circ\text{C}$ 时，由速率方程可得热板与硅片之间的辐射热流密度为

$$q''_{\text{rad}} = \sigma(T_h^4 - T_w^4) = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) [(600 + 273)^4 - (20 + 273)^4] \text{K}^4 = 32.5 \text{kW}/\text{m}^2 \quad \blacktriangleleft$$

由傅里叶定律可得，通过 $L = 0.2\text{mm}$ 的间隙中的气体的导热热流密度为

$$q''_{\text{cond}} = k \frac{T_h - T_w}{L} = 0.0436 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \frac{(600 - 20) \text{K}}{0.0002 \text{m}} = 126 \text{kW}/\text{m}^2 \quad \blacktriangleleft$$

硅片温度在初始时刻的变化速率与加热过程开始时刻硅片上的能量平衡关系有关。

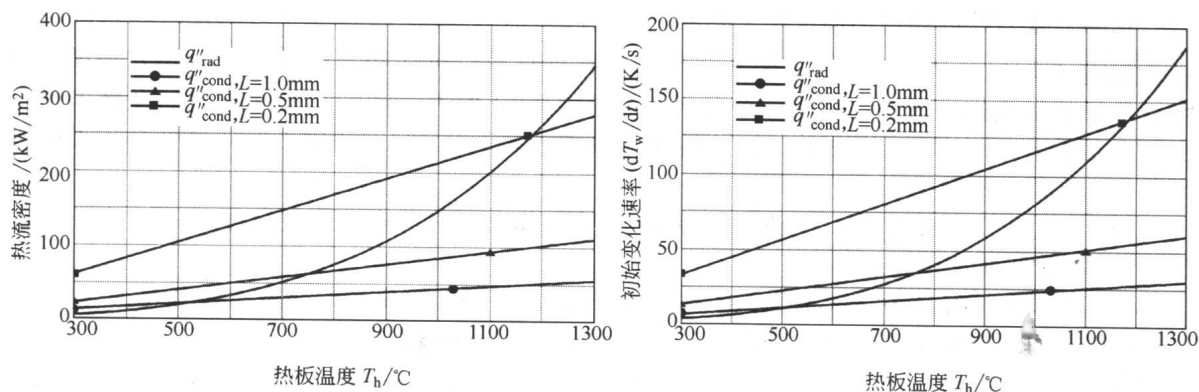
$$\dot{E}''_{\text{in}} - \dot{E}''_{\text{out}} = \dot{E}''_{\text{st}} \quad \dot{E}''_{\text{st}} = \rho c d \left(\frac{dT_w}{dt} \right)_i$$

式中， $\dot{E}''_{\text{out}} = 0$ ， $\dot{E}''_{\text{in}} = q''_{\text{rad}}$ 或 q''_{cond} 。代入数值，得

$$\left. \frac{dT_w}{dt} \right|_{i,\text{rad}} = \frac{q''_{\text{rad}}}{\rho c d} = \frac{32.5 \times 10^3 \text{W}/\text{m}^2}{2700 \text{kg}/\text{m}^3 \times 875 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \times 0.00078 \text{m}} = 17.6 \text{K}/\text{s} \quad \blacktriangleleft$$

$$\left. \frac{dT_w}{dt} \right|_{i,\text{cond}} = \frac{q''_{\text{cond}}}{\rho c d} = 68.6 \text{K}/\text{s} \quad \blacktriangleleft$$

(b) 利用上述方程, 在选定的间距 L 和热板温度 T_h 的变化范围内, 在 $T_w = 20^\circ\text{C}$ 时, 可以算出每种模式的热流密度和初始温度变化速率。



在上面的图中, 导热热流密度随 T_h 线性增加, 随着 L 的增加而减少, 如所预期的一样。辐射热流密度与 L 无关, 与 T_h 有高度非线性关系, 但直到 T_h 接近 1200°C 时, 辐射热流密度才接近导热热流密度的最高值。

初始的温度-时间变化率 $[(dT_w/dt)_i]$ 的总趋势与热流密度的趋势相同。为在 10s 内达到 900°C , 需要平均为 $90\text{K}/\text{s}$ 的温度-时间变化率。认识到 (dT_w/dt) 将随 T_w 的增加而减少, 因此仅在 T_h 非常高和最小 L 的情况下才能达到该速率。

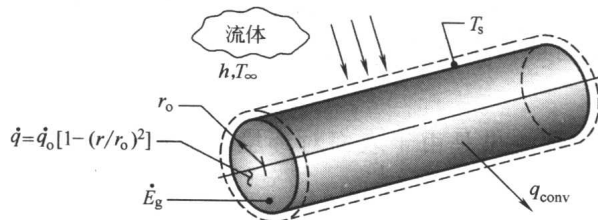
1.18 放射性废物存放在一个薄壁长圆柱形容器中。废物不均匀地产生热能, 可用关系式 $\dot{q} = \dot{q}_0 [1 - (r/r_0)^2]$ 描述, 其中 \dot{q} 是单位容积的局部产能速率, \dot{q}_0 是常数, r_0 是容器的半径。把容器浸没在 T_∞ 的液体中保持稳定状态, 对流系数均匀, 为 h 。

推导单位长度容器内总的能量产生速率的表达式。利用该结果获得容器壁面温度 T_s 的表达式。

已知: 装有放射性废物的圆柱形容器中热量耗散的径向分布; 表面对流条件。

求: 总的能量产生速率和表面温度。

示意图:



假定: (1) 稳态; (2) 可以忽略薄容器壁两侧的温度降。

分析: 能量产生速率为

$$\begin{aligned}\dot{E}_g &= \int \dot{q} dV = \dot{q}_0 \int_0^{r_0} [1 - (r/r_0)^2] 2\pi r L dr \\ &= 2\pi L \dot{q}_0 (r_0^2/2 - r_0^2/4)\end{aligned}$$

或表示成单位长度的

$$\dot{E}'_g = \frac{\pi \dot{q}_0 r_0^2}{2}$$

对围绕容器的控制表面进行能量平衡分析, 在某一时刻, 有

$$\dot{E}'_g - \dot{E}'_{\text{out}} = 0$$

代入单位长度的对流传热速率

$$\frac{\pi \dot{q}_0 r_0^2}{2} = h(2\pi r_0)(T_s - T_\infty)$$

$$T_s = T_\infty + \frac{q_o r_o}{4h}$$

说明：放射性废物内的温度随 r 的减小而增高，从 r_o 处的 T_s 增至中心线处的最大值。

1.20 我们以食物形式消耗的绝大部分能量在进行所有机体功能的过程中转化为热能，最终以热量的形式排出体外。考虑一个每天消耗 2100kcal 的人 [注意，通常所说的食物卡路里实际上是千卡 (kcal)]，其中 2000kcal 转化为热能，剩下的 100kcal 用于对环境做功。人的表面积为 1.8m^2 ，穿着浴衣。

(a) 人处于 20°C 的室内，对流换热系数为 $3\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。在这个空气温度下，人不太出汗。计算人的皮肤的平均温度。

(b) 如果环境温度为 33°C ，为维持皮肤处于舒适的 33°C ，出汗的速率应为多大？

已知：每天热能的产生量、表面积、环境温度和换热系数。

求：(a) 当环境温度为 20°C 时皮肤的温度；(b) 当环境温度为 33°C 时，为维持 33°C 的皮肤温度所需的排汗速率。

假定：(1) 稳态；(2) 在一整天中，热能以恒定的速率产生；(3) 空气和周围墙壁处于相同的温度；(4) 皮肤温度均匀；(5) 浴衣对身体的热损没有影响；(6) 通过对流和辐射对环境散热，在部分 (2) 中靠排汗散热（可以忽略呼吸、排泄废物等造成的热损）；(7) 周围环境很大。

物性：表 A.11，皮肤： $\epsilon = 0.95$ ；表 A.6，水 (306K)： $\rho = 994\text{kg}/\text{m}^3$ ， $h_{fg} = 2421\text{kJ}/\text{kg}$ 。

分析：(a) 能量产生的速率为

$$\dot{E}_g = (2000 \times 10^3 \text{ cal}/\text{d}) / (0.239 \text{ cal}/\text{J} \times 86400 \text{ s}/\text{d}) = 96.9 \text{ W}$$

在稳态条件下，对人体进行能量平衡分析可得

$$\dot{E}_g - \dot{E}_{\text{out}} = 0$$

因此 $\dot{E}_{\text{out}} = q = 96.9 \text{ W}$ 。能量流出是由于表面对环境的对流和净辐射，分别为式 (1.3a) 和式 (1.7)。

$$\dot{E}_{\text{out}} = hA(T_s - T_\infty) + \epsilon\sigma A(T_s^4 - T_{\text{sur}}^4)$$

代入数值，可得

$$96.9 \text{ W} = 3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \times 1.8 \text{ m}^2 \times (T_s - 293 \text{ K}) + 0.95 \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) \times 1.8 \text{ m}^2 \times [T_s^4 - (293 \text{ K})^4]$$

用试凑法求解，或者利用 IHT 或其他方程求解器，我们得到

$$T_s = 299 \text{ K} = 26^\circ\text{C}$$

由于皮肤温度典型的舒适范围是 $32 \sim 35^\circ\text{C}$ ，所以当环境温度为 20°C 时，我们通常穿比浴衣暖和的衣服。

(b) 当环境温度为 33°C 时，如果皮肤温度也为 33°C ，就没有由对流或辐射产生的热损。因此，所有产生的能量都必须由排汗带走

$$\dot{E}_{\text{out}} = \dot{m}h_{fg}$$

我们得到

$$\dot{m} = \dot{E}_{\text{out}}/h_{fg} = 96.9 \text{ W}/2421 \text{ kJ}/\text{kg} = 4.0 \times 10^{-5} \text{ kg}/\text{s}$$

示意图：

