

传热学学习指导 与习题精选

夏国栋 王 军 编



化学工业出版社

传热学学习指导 与习题精选

夏国栋 王 军 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是根据目前国内传热学主流课程体系编写的学习辅导用书。全书按照传热学课程体系分为十章,分别针对导热、对流、辐射、传热过程及换热器等内容进行编写,每一章内容包括学习任务、知识结构、基本知识点、重点与难点、思考题精选和典型习题精选六项内容。在附录中给出了三套北京工业大学往年的传热学研究生入学考试试题。

本书适用于工科高等院校热工相关专业学生学习传热学课程的辅助教材,可供参加研究生考试的学生作考前复习参考,也可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传热学学习指导与习题精选/夏国栋,王军编.

北京:化学工业出版社,2016.4

ISBN 978-7-122-26449-7

I. ①传… II. ①夏…②王… III. ①传热学-高等学校-教学参考资料 IV. ①TK124

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第044446号

责任编辑:李玉晖

文字编辑:杨欣欣

责任校对:王静

装帧设计:关飞

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)

印装:三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张13¼ 字数215千字 2016年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686)

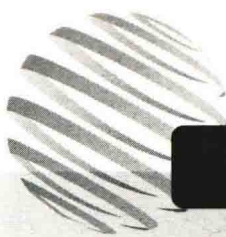
售后服务:010-64518899

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:28.00元

版权所有 违者必究



前言

传热学是工程热物理学的一个重要分支，是研究热量传递规律及其应用的一门科学，广泛应用于能源、动力、化工、机械、电工电子等领域。通过传热学的学习，应使学生掌握热量传递规律及应用基础知识，具备分析工程传热问题的基本能力，掌握计算工程传热问题的基本方法。本课程不仅为学生学习相关专业课程提供基本的理论知识和技能，而且也以后从事能源与动力工程相关领域的工作打下必要的基础。

本书按照传热学主流课程的章节顺序，分别针对导热、对流、辐射、传热过程及换热器等内容进行编写。各章包括学习任务、知识结构、基本知识点、重点与难点、思考题精选、典型习题精选六项内容。每一章首先给出学习任务是为了让学生在学的过程中能够明确自己需要了解、理解和掌握的知识点。知识结构则侧重于对课程内容整体性及其相互联系的把握。基本知识点部分只是针对每一章所涉及的课程内容进行简明扼要的梳理，而不做过于详细的描述。在重点与难点部分，依据编者在北京工业大学多年的传热学教学经验对学生容易混淆或者难以理解的部分进行了对比、分析和解释。精选的思考题多来自于日常生活和工程实际，与传热学教材内容密切结合，并具有一定的知识性和趣味性，有助于学生深入理解相关知识点。典型习题精选是对一些有代表性的习题进行解题示范，并给出讨论分析，一方面帮助学生理解课程内容，学习解题技巧；另一方面也使能够触类旁通，提高分析和解决实际工程传热问题的能力。本书的附录中给出了三套北京工业大学往年的“传热学”研究生入学

考试题，目的是帮助考研学生对传热学课程进行复习。

参与本书编写的有夏国栋、王军，全书由夏国栋主编。在本书的编写过程中，得到了研究生柴磊、江宦明、吴宏杰等的帮助，在此表示衷心的感谢。在本书成稿过程中，也得到了北京工业大学能源学科各位师生的大力支持，在此一并表示感谢。由于编者水平有限，书中难免出现疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2015 年 12 月



目 录

第一章	导热理论基础	/001
第二章	稳态导热	/019
第三章	非稳态导热	/039
第四章	导热问题数值解法基础	/055
第五章	对流传热分析	/073
第六章	单相流体对流传热及特征数关联式	/089
第七章	凝结与沸腾传热	/105
第八章	辐射传热的基本定律	/119
第九章	辐射传热计算	/133
第十章	传热过程和换热器	/155
附录 1	测试练习题	/173
附录 2	北京工业大学研究生入学考试传热学试题选编	/198
参考文献		/204



第一章

导热理论基础

一、学习任务 >>>

本章的学习任务是：掌握热量传递三种方式的物理概念；了解热导率、对流传热系数和辐射传热系数的物理意义；计算各种情况下的传热量或传热过程中的温度及其分布。

学习本章的基本要求是：理解温度场、等温面（线）、温度梯度及热流密度的概念及物理意义；熟悉傅里叶定律的物理意义、数学表达式及其应用；理解单值性条件并针对不同边界条件写出完整的数学描述表达式。

二、知识结构 >>>

1) 基本概念：热传导（导热）、热对流、对流传热、热辐射、辐射传热、传热、热阻、温度场、等温面（线）、温度梯度和热流密度等。

2) 基本计算式：导热量、热流密度、热阻、对流传热、热辐射的计算式等。

3) 各类物质的导热机理。

4) 导热基本规律：傅里叶定律。

5) 导热微分方程式及求解导热微分方程式的单值性条件。

三、基本知识点 >>>

1. 热量传递的基本方式

(1) 热传导（导热） 当物体内有温度差或两个不同温度的物体接触，且物体各部分之间不发生相对位移时，依靠分子、原子及自由电子等微观粒子热运动而产生的热量传递现象。

(2) 热对流 流体中，温度不同的各部分之间发生相对位移时所引起的热量传递过程叫热对流。流体各部分之间由于密度差而引起的相对运动称为自然对流；而由于机械的作用或其他压差而引起的相对运动称为强迫对流。

(3) 热辐射 物体通过电磁波传递能量的过程称为辐射。由于热的原因，物体的内能转化成电磁波的能量而进行的辐射过程称为热辐射。

热辐射的特点是：在热辐射过程中伴随着能量形式的转换（物体内能

→电磁波能→物体内能)；不需要冷热物体直接接触；不论温度高低，物体都在不停地相互发射电磁波能，相互辐射能量，高温物体辐射给低温物体的能量大于低温物体向高温物体辐射的能量，总的结果是热由高温物体（或物体的高温侧）传到低温物体（或物体的低温侧）。

2. 传热过程

(1) 传热过程的概念 热量由壁面一侧的高温流体通过壁面传到另一侧的低温流体中去的过程，称为传热过程。

(2) 传热系数 传热系数表明单位时间、单位面积上，冷热流体间每单位温度差可传递的热量，用符号 K 表示，国际制单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，反映传热过程的强弱。

(3) 热阻 热阻是将热流量的计算公式与电流的计算公式对比后导出的物理量。传热过程的热阻等于热流体、冷流体的对流传热热阻及壁的导热热阻之和，相当于串联电阻的计算方法。

3. 热量传递的基本计算式

(1) 计算平壁热传导的基本公式

① 热流量 Φ (单位为 W) 的计算式

$$\Phi = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t A = \frac{\lambda}{\delta} (t_{w1} - t_{w2}) A \quad (1-1)$$

② 热流密度 q (单位为 W/m^2) 的计算式

$$q = \frac{\Phi}{A} = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t = \frac{\lambda}{\delta} (t_{w1} - t_{w2}) \quad (1-2)$$

式中， A 是壁面面积， m^2 ； δ 是壁厚， m ； Δt 是壁两侧表面的温度差， $\Delta t = t_{w1} - t_{w2}$ ， $^{\circ}\text{C}$ ； t_{w1} 和 t_{w2} 是平壁两侧表面温度， $^{\circ}\text{C}$ ； λ 是热导率（又称导热系数）， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

(2) 计算对流传热的基本公式

$$\Phi_c = A h_c \Delta t \quad (1-3)$$

$$q_c = h_c \Delta t \quad (1-4)$$

流体被加热时

$$\Delta t = t_w - t_f$$

流体被冷却时

$$\Delta t = t_f - t_w$$

式中， Φ_c 是对流传热热流量， W ； A 是固体壁面面积， m^2 ； q_c 是对流传热热流密度， W/m^2 ； t_w 是固体壁表面温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t_f 是流体温度， $^{\circ}\text{C}$ ； Δt 是

固体壁表面与流体温度差,℃; h_c 是对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

(3) 热辐射计算式 对于黑体, 它的辐射力 E_b 与表面热力学温度的 4 次方成比例, 即斯忒藩-玻耳兹曼定律。公式为

$$E_b = \sigma_b T^4 \quad (1-5)$$

$$\Phi_r = \sigma_b T^4 A = c_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 A \quad (1-6)$$

式中, E_b 是黑体辐射力, W/m^2 ; σ_b 是黑体辐射常数, $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; T 是热力学温度, K ; Φ_r 是黑体表面辐射的热流量, W ; c_b 是黑体辐射系数, $c_b = 5.67 W/(m^2 \cdot K^4)$; A 是辐射表面积, m^2 。

实际物体的辐射力都低于同温度下黑体的辐射力, 于是有

$$E = \epsilon E_b \quad (1-7)$$

式中, ϵ 为实际物体表面的发射率, 也称黑度, 其值处于 0~1 之间。

两个相距很近的无限大平行平板间的热辐射是最简单的辐射传热问题, 设两平板表面热力学温度分别为 T_1 和 T_2 , 则两表面间单位面积、单位时间辐射传热热流密度的计算式为

$$q_r = c_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (1-8)$$

式中, $c_{1,2}$ 为 1 和 2 两表面间的系统辐射系数, 它取决于辐射表面材料性质及状态, 其值在 0~5.67 之间。

(4) 传热过程计算式 两流体间的传热过程的热流密度为

$$q = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} (t_{f1} - t_{f2}) = K (t_{f1} - t_{f2}) = K \Delta t \quad (1-9)$$

对于面积为 $A(m^2)$ 的平壁, 传热量 Φ 为

$$\Phi = qA = K (t_{f1} - t_{f2}) A = KA \Delta t \quad (1-10)$$

式中, K 为传热系数, 其计算式为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad (1-11)$$

将式 (1-1)、式 (1-2) 变换形式后与电学中的欧姆定律 $I = \frac{U}{R} = \frac{\Delta V}{R}$ 比较, 可推导出两个新的物理量—— R 和 r 。

$$q = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{\Delta t}{r} \quad (1-12)$$

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{\Delta t}{R} \quad (1-13)$$

$$r = RA \quad (1-14)$$

式中, R 为导热面积为 A 时的导热热阻, K/W ; r 为单位导热面积的导热热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ 。

4. 气体、介电体、金属等的导热机理

在气体中, 导热是气体分子不规则热运动时相互作用或碰撞的结果。介电物质的导热可以看成是声子相互作用和碰撞的结果。在金属中, 导热主要是通过自由电子的相互作用和碰撞来实现的。在液体中, 导热也是主要依靠晶格的振动来实现。

5. 导热基本概念

(1) 温度场 温度场是指某一时刻空间所有各点温度的总和, 一般是空间和时间的函数, 对直角坐标系有

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (1-15)$$

(2) 等温面与等温线 温度场中同一瞬间同温度各点连成的面称为等温面。在任何一个二维的截面上等温面表现为等温线。

特点: 两个不同温度的等温面或两条不同温度的等温线绝不会彼此相交。当等温线图上每两条相邻等温线间的温度间隔相等时, 等温线的疏密可直观反映出不同区域导热热流密度的相对大小。

(3) 温度梯度 自等温面上某点到另一个等温面, 以该点法线方向的温度变化率为最大。以该点法线方向为方向, 数值也正好等于这个最大温度变化率的矢量称为温度梯度。用 $\text{grad } t$ 表示, 其正向是指向温度增加的方向。

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial n} \mathbf{n} \quad (1-16)$$

式中, $\mathbf{n}$ 表示法线方向上的单位矢量; $\frac{\partial t}{\partial n}$ 表示沿法线方向温度的方向导数。

(4) 热流密度 单位时间、单位面积上所传递的热量称为热流密度。等温面上某点, 以通过该点最大热流密度的方向为方向, 数值上也正好等

于该方向热流密度的矢量称为热流密度矢量，简称热流矢量。

6. 傅里叶定律

傅里叶定律用热流密度 q 表示时，有下列形式

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1-17)$$

式中， n 为等温面法线方向。它表明，在数值上，在各向同性均质的导热物体中，通过某导热面积的热流密度正比于该导热面法向温度变化率。

傅里叶定律的矢量表达式为

$$\mathbf{q} = -\lambda \text{grad } t = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \mathbf{n} \quad (1-18)$$

上式说明热流矢量和温度梯度位于等温面的同一法线上，但指向温度降低的方向。

对于无限大平壁，设 x 为垂直于平壁的坐标轴，则有

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (1-19)$$

7. 热导率

热导率的定义式为

$$\lambda = -\frac{q}{\text{grad } t} \quad (1-20)$$

热导率在数值上等于单位温度梯度作用下产生的热流密度矢量的模。热导率是材料固有的热物理性质，表征物质导热能力的大小，它的单位是 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

在一定温度范围内，许多工程材料的热导率可以认为是温度的线性函数。关系式为

$$\lambda = \lambda_0 (1 + bt) \quad (1-21)$$

式中， λ_0 是某个参考温度时的热导率； b 是由实验确定的常数。气体的热导率数值一般在 $0.006 \sim 0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 范围内，液体的热导率数值一般在 $0.07 \sim 0.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 范围内，金属的热导率一般在 $12 \sim 418 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 范围内变化，非金属的热导率一般在 $0.025 \sim 3.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 范围内。

典型物质的热导率（温度 $t = 20^\circ\text{C}$ 时）：纯铜 $\lambda = 399 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；碳钢 $\lambda = 35 \sim 40 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；水 $\lambda = 0.599 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；干空气 $\lambda =$

0.0259W/(m·K)。

8. 导热微分方程

直角坐标系下导热微分方程表达式

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad (1-22)$$

式中, ρ 、 c 、 $\dot{\Phi}$ 及 τ 分别为微元体的密度、比热容、单位时间内单位体积中内热源的生成热及时间。

当热物性参数 λ 、 ρ 和 c 均为常数时

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{\Phi}}{\rho c} \quad (1-23a)$$

或写成

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{\dot{\Phi}}{\rho c} \quad (1-23b)$$

式中, ∇^2 为拉普拉斯算子, $\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$; a 为热扩散率, $a = \lambda / \rho c$, m^2/s 。

当热物性参数为常数且无内热源时, 式 (1-22) 可写为

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t \quad (1-24)$$

对于稳态温度场, $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$, 式 (1-22) 可写为

$$\nabla^2 t + \frac{\dot{\Phi}}{\lambda} = 0 \quad (1-25)$$

对于无内热源的稳态温度场, 式 (1-22) 可写为

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (1-26)$$

圆柱坐标系下导热微分方程表达式

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \phi} \right) + r \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] + \dot{\Phi} \quad (1-27)$$

球坐标系下的导热微分方程表达式

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \times \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \times \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \sin \theta \frac{\partial t}{\partial \theta} \right) + \dot{\Phi} \quad (1-28)$$

9. 导热过程的单值性条件

一个具体给定的导热过程，其完整的数学描述应包括导热微分方程式和它的单值性条件两部分。

单值性条件一般有以下四项：

- (1) 几何条件 说明参与导热过程物体的几何形状和大小。
- (2) 物理条件 说明参与导热过程物体的导热特征。
- (3) 时间条件 稳态导热过程没有单值性的时间条件，因为过程的进行不随时间发生变化。对于非稳态导热过程，应该说明过程开始时刻物体内的温度分布。

(4) 边界条件

- ① 第一类边界条件是已知任何时刻物体边界上的温度分布。
- ② 第二类边界条件是已知任何时刻物体边界上的热流密度分布 q_w 。
- ③ 第三类边界条件是已知边界面周围流体温度 t_f 和边界面与流体之间的表面传热系数 h 。

四、重点与难点 >>>

1. 本章重点

- ① 对热量传递三种基本形式关系的理解。传热包括热传导、热对流、热辐射三种基本传热方式。各种传热方式传热机理不同，却可以同时存在于一个传热现象中；相互关系可以是串连的，也可以是并联的。
- ② 傅里叶定律和导热微分方程式及其单值性条件的数学描述。

2. 本章难点

(1) 对对流传热的理解和对热阻的理解 因为有温度差，热对流将同时伴随热传导，所以，对流传热过程的传热机制是既有热对流的作用，亦有热传导的作用。故对流传热与热对流不同：热对流是一种基本传热方式；而对流传热是流体的宏观热运动（热对流）与流体的微观热运动（热传导）联合作用的结果。

严格地讲，热阻概念只适用于一维热量传递过程，且在传递过程中热量不能有任何形式的损耗。对一个工程传热问题而言，应首先能正确区分某一传热过程由几个串连的环节组成，而每一环节中又有哪几种并联的传

热方式。然后根据热阻分析原理，分析工程及实际问题。

(2) 对于热导率和导热微分方程的理解 热导率是物理性质参数，它与物体所处的热力学状态有关。根据导热的基本规律——傅里叶定律和能量守恒与转化定律建立起导热温度场的通用微分方程式，即导热微分方程式。此方程式对连续均匀和各向同性介质中的任何导热现象都是正确的。

五、思考题精选 >>>

1. 试分析室内暖气片的散热过程，各个环节有哪些热量传递方式？以暖气片管内走热水为例。

答：

有以下换热环节及传热方式：

- ① 由热水到暖气片管道内壁，热传递方式为强制对流换热；
- ② 由暖气片管道内壁到外壁，热传递方式为固体导热；
- ③ 由暖气片管道外壁到室内空气，热传递方式有自然对流换热和辐射换热。

2. 夏季在维持 20°C 的室内，穿单衣感觉到舒服，而冬季在保持同样温度的室内却必须穿绒衣。试从传热学的观点分析其原因。冬季挂上窗帘后顿感暖和，原因何在？

答：人体在房间里以对流传热和辐射传热的方式散失热量。室内维持 20°C ，冬季和夏季人在室内对流散热不变。由于夏天室外温度 t_{fo} 比室内温度 t_{fi} 高，冬天 t_{fo} 比 t_{fi} 低，所以墙壁内温度分布不同，墙壁内表面温度 t_{wi} 在夏季和冬季不一样。显然 $t_{wi}^{\text{夏}} > t_{wi}^{\text{冬}}$ ，这使得人体与墙壁内表面的辐射传热量也不同，冬天比夏天多。因此在 20°C 房内，人体在冬天向外散热比在夏天时多，因而感到冷。

冬季挂上窗帘后相当于在人体与窗户间加入了遮热板，减少了两者之间的辐射传热量，所以人顿感暖和。

六、典型习题精选 >>>

1. 利用傅里叶定律分析，在什么条件下图 1-1 中平壁内的温度呈直线关系变化？什么条件下呈曲线关系变化？

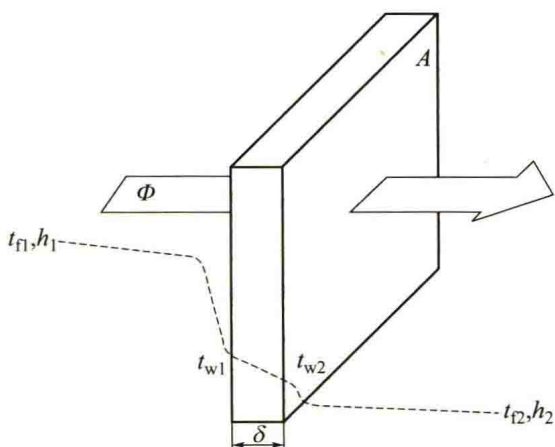


图 1-1 习题 1 附图

解：由傅里叶定律 $q = -\lambda \frac{dt}{dx}$ 得

$$t = -\frac{q}{\lambda}x + C$$

由边界条件 $t|_{x=0} = t_{w1}$ 得 $C = t_{w1}$ ，故

$$t = -\frac{q}{\lambda}x + t_{w1}$$

当 q 、 λ 为常量时，平壁内温度分布呈直线关系。当 λ 与温度有关或平壁内存在内热源（ q 变化）时，平壁内温度呈曲线关系变化。

讨论：试画出无内热源、热导率随温度增加而增加、稳态导热时的温度分布曲线。热导率随温度增加而减少时，温度分布曲线又如何？

2. 求房屋外墙单位面积的散热量以及它的内外表面温度 t_{w1} 和 t_{w2} 。已知：外墙厚 $\delta = 360\text{mm}$ ，墙的热导率 $\lambda = 0.61\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，室内温度 $t_{f1} = 18^\circ\text{C}$ ，室外温度 $t_{f2} = -10^\circ\text{C}$ ，内壁表面传热系数 $h_1 = 8.7\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，外墙表面传热系数 $h_2 = 24.5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

解：（1）房屋外墙单位面积的散热量，即房屋外墙的热流密度为

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} = \frac{18 - (-10)}{\frac{1}{8.7} + \frac{0.36}{0.61} + \frac{1}{24.5}} = 37.5 (\text{W}/\text{m}^2)$$

（2）房屋外墙内表面温度 t_{w1} ，由式（1-4）经公式变换得

$$t_{w1} = t_{f1} - \frac{q}{h_1} = 18 - \frac{37.5}{8.7} = 13.7 (^\circ\text{C})$$