

高等学校教学用书

环境工程原理

G AODENG

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

冶金工业出版社

977709

X5
4768

X5
4768

高等学校教学用书

环境工程原理

昆明工学院 杨昌竹 主编

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

图书在版编目(CIP)数据

环境工程原理/杨昌竹主编. —北京:冶金工业出版社,
1994.10
高等学校教学用书
ISBN 7-5024-1485-1

I. 环… II. 杨… III. 环境工程-热处理 IV. ①X②TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 03861 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)
香河县第二印刷厂印刷; 冶金工业出版社出版; 各地新华书店发行
1994 年 10 月第 1 版, 1994 年 10 月第 1 次印刷
787mm×1092mm 1/16; 21.5 印张; 510 千字; 334 页; 1-1100 册
12.70 元

前 言

“环境工程原理”是一门理论性与实践性较强的学科,是环境工程专业本科生一门必修的技术基础课。除了课堂讲授外,还有实验课和课程设计,足见本课程在环境工程专业教学中居重要地位。

本书由传热及传热设备和传质分离过程两部分内容组成。结合我国高校实际情况,“环境流体力学”及“焚烧与反应工程”另设课。

新编一本书,除了表达作者的见解外,亦必借鉴前人的成果。本书在多年教学经验的基础上,参阅国内外有关资料,并紧密结合环境治理工程实际编写而成。全书力求做到由浅入深,理论联系实际,重视概念与原理的阐述,对于设备,着重操作原理的分析。对于设计计算侧重原则与方法的论述,引导学生从工程角度考虑问题,培养学生分析与解决问题的能力,具体设计步骤从简。每章末编有必要的习题并附有参考答案。书末摘编的附录供做习题时查用。

本书在编写过程中,得到了各方大力支持和指教,陈澄华教授、张秦岭高级工程师、李柳琼副教授参加审稿,对此编者深表谢意。

本书由昆明工学院杨昌竹主编,参加编写的有西安建筑科技大学刘君华、青岛建筑工程学院崔维成。第2、5、8章由刘君华执笔,第3章由崔维成执笔,其余由杨昌竹执笔。由于编者学识所限,书中欠妥之处一定不少,恳望读者赐教。

编 者

1992年8月

目 录

绪论	(1)
1 传热及传热设备	(3)
1.1 概 述	(3)
1.2 热 传 导	(4)
1.2.1 热传导的基本概念和傅立叶定律	(4)
1.2.2 导热系数	(5)
1.2.3 平壁的稳定热传导	(5)
1.2.4 圆筒壁的稳定热传导	(7)
1.2.5 保温层的临界厚度和经济厚度	(9)
1.3 对流传热及对流传热系数	(11)
1.3.1 对流传热分析	(11)
1.3.2 影响对流传热系数的因素	(12)
1.3.3 因次分析在对流传热中的应用	(12)
1.3.4 流体作强制对流时的对流传热系数	(13)
1.3.5 流体作自然对流时的对流传热系数	(17)
1.3.6 蒸汽冷凝时的对流传热系数	(18)
1.3.7 液体沸腾时的对流传热系数	(22)
1.3.8 非牛顿型流体的对流传热系数	(25)
1.4 传热过程计算	(26)
1.4.1 总传热速率方程	(26)
1.4.2 热负荷的计算	(27)
1.4.3 平均温度差的计算	(28)
1.4.4 总传热系数	(30)
1.5 热 辐 射	(35)
1.5.1 物体的辐射能力与普朗克定律	(36)
1.5.2 斯蒂芬-波尔兹曼定律和克希霍夫定律	(37)
1.5.3 两固体间的辐射传热	(38)
1.5.4 遮热板	(40)
1.5.5 气体的热辐射性质	(42)
1.5.6 自然环境中的热辐射与“热污染”的概念	(45)
1.5.7 气体与壁面间的辐射传热	(46)
1.5.8 对流与辐射的联合传热	(46)
1.6 换 热 器	(47)
1.6.1 换热器的类型	(47)
1.6.2 列管式换热器	(49)
1.6.3 换热器传热的强化途径	(58)
1.6.4 新型换热器	(58)
习 题	(61)

2 传质导论	(65)
2.1 概 述	(65)
2.1.1 传质过程的基本概念	(65)
2.1.2 环境治理工程中常见的传质过程	(65)
2.2 扩散原理	(67)
2.2.1 不稳定分子扩散与菲克(Fick)定律	(67)
2.2.2 一维稳定分子扩散	(67)
2.2.3 扩散系数	(72)
2.2.4 湍流流体中的扩散	(76)
2.3 质量、热量、动量传递之间的联系	(78)
2.3.1 动量传递	(78)
2.3.2 热量传递	(80)
2.3.3 质量传递	(80)
2.3.4 流体湍流运动引起的动量、热量、质量传递	(82)
习 题	(87)
3 吸收分离过程与设备	(88)
3.1 概 述	(88)
3.1.1 吸收基本概念	(88)
3.1.2 吸收在环境工程中的重要地位	(88)
3.2 气液相平衡	(89)
3.2.1 气体在液体中的溶解度	(89)
3.2.2 亨利定律	(89)
3.2.3 相平衡与吸收过程的关系	(91)
3.3 传质速率	(92)
3.3.1 传质速率方程的表示方法	(93)
3.3.2 传质系数间的换算关系	(94)
3.3.3 界面浓度的确定	(95)
3.3.4 吸收控制步骤	(95)
3.4 吸收设备	(97)
3.4.1 吸收设备的分类	(97)
3.4.2 膜式吸收器	(97)
3.4.3 气体分散式吸收器	(99)
3.4.4 液体分散式吸收器	(101)
3.4.5 吸收设备的选择原则	(102)
3.5 填料吸收塔的设计计算	(103)
3.5.1 填料的选择	(103)
3.5.2 吸收剂的选择	(106)
3.5.3 填料塔的流体力学性能	(106)
3.5.4 填料塔塔径的计算	(109)
3.5.5 填料吸收塔操作线方程	(111)
3.5.6 吸收剂用量的确定	(112)
3.5.7 低浓度气体吸收填料层高度的计算	(113)

3.5.8	传质系数	(120)
3.6	板式塔的设计计算	(126)
3.6.1	低浓度气体吸收板式塔操作线方程	(126)
3.6.2	塔板数的计算	(126)
3.6.3	板式吸收塔的效率	(127)
3.6.4	板式塔的流体力学性能	(129)
3.6.5	筛板塔塔径的计算	(136)
3.6.6	筛板结构	(137)
3.6.7	筛板吸收塔设计计算举例	(138)
3.7	管束塔	(144)
3.7.1	管束塔的流体力学性能	(144)
3.7.2	管束塔的传质系数	(146)
3.7.3	管束塔传质速率方程	(147)
3.7.4	填料塔、板式塔及管束塔的比较	(149)
3.8	化学吸收	(150)
3.8.1	化学吸收的特点	(150)
3.8.2	化学吸收机理	(150)
3.8.3	伴有不可逆反应的化学吸收增强系数	(151)
3.8.4	化学吸收设计计算	(154)
3.9	脱吸	(159)
习 题	(161)
4	吸附分离	(164)
4.1	吸附的基本概念	(164)
4.1.1	概 述	(164)
4.1.2	吸附在环境治理工程中的应用	(164)
4.1.3	吸附过程分类	(165)
4.1.4	吸附剂	(166)
4.2	吸附平衡	(167)
4.2.1	单组分吸附平衡	(167)
4.2.2	气体混合物的吸附平衡	(170)
4.2.3	液体溶液的吸附	(171)
4.3	吸附速率	(173)
4.4	固定床吸附分离	(175)
4.4.1	吸附负荷曲线	(175)
4.4.2	吸附透过曲线	(178)
4.4.3	吸附等温线对固定床传质区和吸附波的影响	(180)
4.4.4	固定床的吸附分离计算	(182)
4.4.5	固定床压降	(187)
4.5	超吸附	(187)
4.5.1	移动床吸附分离过程和设备	(187)
4.5.2	移动床吸附计算	(188)
4.5.3	模拟移动床吸附分离	(195)

习 题	(197)
5 萃 取	(199)
5.1 概 述	(199)
5.1.1 萃取的基本概念	(199)
5.1.2 萃取在环境工程中的应用	(199)
5.2 萃取基本原理	(200)
5.2.1 三角形相图	(200)
5.2.2 直角坐标系中的相平衡	(203)
5.2.3 影响萃取操作的主要因素	(204)
5.3 萃取操作流程与计算	(206)
5.3.1 单级萃取流程与计算	(206)
5.3.2 多级错流萃取流程与计算	(209)
5.3.3 多级逆流萃取流程与计算	(213)
5.3.4 连续接触逆流萃取计算	(218)
5.4 萃取设备	(221)
5.4.1 萃取操作过程分析与萃取设备的分类	(221)
5.4.2 混合-澄清槽	(222)
5.4.3 无机械能量输入的萃取塔	(223)
5.4.4 输入机械能量的萃取塔	(225)
习 题	(229)
6 离子交换	(231)
6.1 离子交换剂	(231)
6.1.1 离子交换树脂的骨架材料	(231)
6.1.2 离子交换树脂的骨架结构	(232)
6.1.3 离子交换树脂的性质	(234)
6.1.4 新型离子交换剂	(235)
6.2 离子交换基本原理	(236)
6.2.1 离子交换平衡	(236)
6.2.2 影响离子交换平衡的因素	(241)
6.2.3 离子交换动力学	(243)
6.3 离子交换过程与计算	(246)
6.3.1 固定床离子交换	(246)
6.3.2 多级逆流流化床离子交换	(248)
6.3.3 流化床与固定床的比较	(249)
6.3.4 淋洗剂的选择	(250)
6.3.5 固定床离子交换废水处理设计计算举例	(250)
6.3.6 多级逆流流化床离子交换设备计算	(253)
习 题	(256)
7 膜分离	(258)
7.1 膜分离概述	(258)
7.2 反渗透	(259)

7.2.1	渗透与渗透压	(259)
7.2.2	反渗透	(260)
7.2.3	反渗透的水力计算	(261)
7.2.4	反渗透装置	(262)
7.3	超滤	(265)
7.3.1	超滤通量与浓差极化	(265)
7.3.2	浓差极化边界层模型、渗透压模型、凝胶层模型及其关联	(268)
7.4	电渗析	(270)
7.4.1	电渗析原理	(270)
7.4.2	电渗析器	(271)
7.4.3	电渗析计算	(272)
7.4.4	电渗析在废水处理中的应用	(274)
习 题	(275)
8	干燥	(276)
8.1	概 述	(276)
8.2	湿空气的性质与湿度图	(276)
8.2.1	湿空气的性质	(276)
8.2.2	湿空气的湿度图	(280)
8.3	物料平衡与热量平衡	(284)
8.3.1	物料衡算	(284)
8.3.2	热量衡算	(286)
8.4	干燥速率与干燥时间	(289)
8.4.1	物料中所含水分的性质	(289)
8.4.2	恒定干燥条件下的干燥速率	(290)
8.4.3	恒定干燥条件下干燥时间的计算	(291)
8.5	干燥器	(293)
8.5.1	干燥器的分类	(293)
8.5.2	常用干燥器	(294)
习 题	(296)
附录 A	常用单位的换算	(297)
附录 B	干空气的物理性质(101.33kPa).....	(299)
附录 C	水的物理性质	(301)
附录 D	水在不同温度下的粘度	(302)
附录 E	水的饱和蒸汽压(-20℃至 100℃)	(303)
附录 F	饱和水蒸气表(以温度为准)	(305)
附录 G	某些液体的导热系数	(309)
附录 H	某些气体和蒸气的导热系数	(311)
附录 I	某些固体材料的导热系数	(313)
附录 J	常用固体材料的密度和比热	(314)
附录 K	气体的粘度	(315)
附录 L	液体的粘度和密度	(317)

附录 M	液体的比热	(320)
附录 N	101.3kPa 压强下气体的比热	(322)
附录 O	蒸发潜热(气化热)	(324)
附录 P	某些有机液体的相对密度(液体密度与 277K 水的密度之比)	(326)
附录 Q	壁面污垢的热阻(污垢系数) $m^2 \cdot K/W$	(328)
附录 R	管壳式热交换器系列标准(摘录)	(329)
附录 S	国产离子交换树脂的型号、结构	(331)
主要参考文献	(334)

绪 论

随着人类社会的发展,环境问题日趋突出。自20世纪50年代后期,在许多国家里发现现代工业和城市生活排污所带来的环境污染已成为人们焦虑的问题,这个问题如不能妥善解决,将使人类赖以生存的生态条件日趋恶化,而严重威胁人类的安全。“环境科学”的一个重要分支——环境工程学——便是研究、解决工业及生活排污所带来的环境污染问题。《环境工程原理》是环境工程专业一门必不可少的技术基础课程,它不同于理论基础课,也不同于专业课,而是两者的“桥梁”,在专业教学中起着承上启下的作用,是一门理论性与实践性较强的学科。

在环境治理工程中,针对不同的污染物,有多种多样的治理方法和流程,本课程不具体研究每个污染物的治理技术,而是从繁多的工艺过程中将其共同遵循的基本原理及通用的典型设备抽提出来,加以系统化和理论化,组成单元过程,使之更具有普遍意义。实际上各种具体污染物的治理工艺过程,便是这些单元过程的科学组合。例如目前工业上烟道气中 SO_2 的净化工艺便是除尘、换热、吸收(或吸附)等单元过程的科学组合。

0.1 《环境工程原理》课程的性质、任务与内容

《环境工程原理》是在高等数学、物理学及物理化学等课程的基础上开设的一门技术基础课程,其主要任务是研究工业及生活排污治理技术中各单元过程的基本原理、典型设备的构造与操作原理,以及各单元过程的设计计算。通过本课程的学习,可使学生获得作为环境治理工程师所必备的技术基础知识,培养学生分析问题和解决问题的能力,为从事工程设计、科学研究以及操作管理打下坚实的基础。

由于篇幅所限,本书仅含两个方面的内容:

1) 传热及传热设备 研究工程中三种基本传热方式的热传递规律,及换热器的设计计算;探讨热能的合理利用及“热污染”的基本概念。

2) 传质分离过程 研究物质通过相界面传递过程的基本规律,以及主要受这些基本规律支配的污染物分离单元过程,如平衡分离过程中的吸收、吸附、萃取、离子交换和干燥等;速率控制分离过程中的超滤、电渗析、反渗透等膜分离技术。

本课程的理论基础是动量传递、热量传递与质量传递,即所谓的“三传理论”。平衡关系和过程速率是研究各单元过程理论的基本内容;物料衡算与能量衡算是常用的手段;最后是单元过程的设计计算。这是学好本课程三个关键。有关这些内容的讨论将在以后各章节中陆续进行,这里不再赘述。

0.2 单位换算

本书采用国家法定的计量单位制。但由于历史和地区的原因,非法定单位还常出现于各类手册中,因此就有个单位换算的问题,常用单位换算因数可以从本书的附录中查得。下面举两例说明。

例 0-1 通用气体常数 $R=82.06\text{atm}\cdot\text{cm}^3/(\text{mol}\cdot^\circ\text{K})$,将其换算为法定单位 kJ/kmol

· K

解

$$R = 82.06 \frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{K}} = 82.06 \left(\frac{1.013 \times 10^5 \text{N}}{\text{m}^2} \right) (0.01\text{m})^3 \left(\frac{1}{0.001 \text{kmol}} \right) \left(\frac{1}{\text{K}} \right)$$

$$= 8313 \text{N} \cdot \text{m} / (\text{kmol} \cdot \text{K}) = 8.313 \text{kJ} / (\text{kmol} \cdot \text{K})$$

例 0-2 水蒸气在空气中的扩散系数可用如下经验式计算:

$$D = \frac{1.46 \times 10^{-4}}{p} \times \frac{T^{\frac{5}{2}}}{T + 441}$$

式中 D ——扩散系数, ft/h;

p ——压力, atm;

T ——绝对温度, °R。

因上述单位为非法定单位, 请换算成法定单位。

解 先列出各有关量不同单位间的关系:

$$1 \text{ft} [\text{英尺}] = 0.3048 \text{m} \quad 1 \text{h} = 3600 \text{s}$$

$$1 \text{atm} = 1.0133 \times 10^5 \text{Pa} \quad 1^\circ\text{R} = \frac{1}{1.8} \text{K}$$

以 D' 、 p' 、 T' 分别代表扩散系数、压力、温度等三个物理量, 则原式可写成:

$$\frac{D'}{[\text{ft}^2/\text{h}]} = \frac{1.46 \times 10^{-4}}{\frac{p'}{[\text{atm}]}} \times \frac{\left(\frac{T'}{[^\circ\text{R}]} \right)^{\frac{5}{2}}}{\frac{T'}{[^\circ\text{R}]} + 441}$$

引入各换算因数进行单位换算:

$$\frac{D'}{[\text{ft}^2/\text{h}] \times (0.3048 \text{m}/\text{ft})^2 \times \left(\frac{1}{3600} \text{h}/\text{s} \right)}$$

$$= \frac{1.46 \times 10^{-4}}{\frac{p'}{[\text{atm}] \times (1.0133 \times 10^5 \text{Pa}/\text{atm})}} \times \frac{\left\{ \frac{T'}{[^\circ\text{R}]} \times \left(\frac{1}{1.8} \text{K}/^\circ\text{R} \right) \right\}^{\frac{5}{2}}}{\frac{T'}{[^\circ\text{R}] \times \left(\frac{1}{1.8} \text{K}/^\circ\text{R} \right)} + 441}$$

整理后得:

$$\frac{D'}{[\text{m}^2/\text{s}]} = \frac{1.659 \times 10^{-3}}{\frac{p'}{[\text{Pa}]}} \times \frac{\left(\frac{T'}{[\text{K}]} \right)^{\frac{5}{2}}}{1.8 \times \frac{T'}{[\text{K}]} + 441}$$

所以, 单位变换后的经验公式为: $D = \frac{9.217 \times 10^{-4}}{p} \times \frac{T^{\frac{5}{2}}}{T + 245}$

式中 D ——扩散系数, m^2/s ;

p ——压力, Pa

T ——温度, K。

1 传热及传热设备

1.1 概 述

传热即热的传递,是自然界和工程技术领域中极普遍的一种传递过程。根据热力学第二定律,凡是有温度差存在的地方,总会发生热量从温度较高处传往温度较低处的能量传递过程。在热量传递的同时,会出现能量的相互转化,例如,机械能、电能、化学能等与热的相互转化。研究热和其它形式的能之间相互转化是“热力学”的任务。研究热的传递规律,计算给定条件下的传热速率,亦即“热流量”的大小,则是“传热学”的任务。传热学和热力学一起,成为了解各种热物理现象的理论基础。

在人类生产实践中,总离不开能的利用。在现代大量的工程设计中普遍涉及到传热问题,环境工程亦不例外,例如焚烧炉的设计;废气、废水治理中的能量供应或移走;工业废热的回收利用;清洁能源利用与节能工程;热辐射防护以及“热污染”控制等,均离不开传热学,因此传热学是环境工程专业学生必备的理论基础。

热量的传递是一个复杂的过程,但在工程实际中所涉及的大量传热问题,归纳起来不外乎有两种类型:一是着眼于传热速率的大小及其控制问题,或者增强传热、缩小设备尺寸以提高生产能力,或者削弱传热、加强隔热保温措施以避免散热损失;另一类则着眼于温度分布及其控制。要控制传热,必须研究传热规律,才有可能按照工程技术的要求,找出增强或削弱热流的有效控制措施。

根据传热机理的不同,自然界热的传递有三种基本方式:热传导、对流传热和热辐射。

(1) 热传导 热传导简称导热,是指温度不同的各部分物质仅由于直接接触,没有相对宏观运动时所发生的能量传递现象。导热是物质的本能。根据分子运动论,温度是物质热运动激烈程度的衡量,只要物质内部温度分布不均匀,不同地点微观粒子的动能就不会相等,通过气体中分子或原子的彼此碰撞、液体和不导电固体中的弹性波作用、以及金属中还依靠自由电子从温度较高区向较低区的扩散而引起能量的传递。

(2) 对流传热 对流传热是指流体中温度不同的各部分相互混合的宏观运动引起能量传递的现象。对流传热仅发生在流体中,因而它与流体的流动状况密切相关。在对流传热时,必然伴随着流体质点间的热传导,事实上,要将它们分开是困难的。在工程上最具实际意义的,是相对运动着的流体与所接触的固体壁面之间的热量交换过程,一般叫作“对流换热”。流体产生对流的原因有二:一为流体中各质点温度不同引起密度差而导致的自然对流;二为流体质点在外力作用下产生的强制对流。因此研究对流传热,总以流体的导热和流体动力学为基础。

(3) 热辐射 由热产生的电磁波在空间的传递,称为热辐射。物体(固、液、气体)都能将热能以电磁波的形式发射出去而在空间传播,当遇到另一物体时,则电磁波可部分地或全部地被吸收而又转化为热能。因此,热辐射不仅是能量的转移,而且还伴随着能量的转化,这是热辐射区别于热传导和对流传热的特点之一;其二是热辐射为不接触的传热,不需要任何

物质做媒介,是真空中唯一能够传递热量的方式。两个不接触的物体,相互辐射和吸收的结果,构成辐射传热过程,引起净热量从温度较高的一方朝着温度较低的另一方转移。应指出,任何物体只要在绝对零度以上,都能发射辐射能,但是只有在物体的温度差别较大时,辐射传热才能成为主要的传热方式。

实际上,上述三种传热基本方式,常常不是单独出现的。工程上遇到的传热过程,往往是两种或三种传热方式的组合。例如工业上常用的间壁式换热器,主要是以对流和热传导相结合的方式进行的。

1.2 热传导

1.2.1 热传导的基本概念和傅立叶定律

1.2.1.1 温度场和温度梯度

导热属于接触传热。物体或系统内的各点间的温度差,是热传导的必要条件。只要各点间存在着温度差,热就可从高温点向低温点传导,即产生热流,而热流的大小,取决于物体或系统内部温度分布。物体或系统内各点温度在任一瞬间的分布情况,称为温度场, $t=f(x,y,z,\theta)$ 。温度场不随时间变动时,称为稳定温度场,由此产生的导热称为稳定导热, $t=f(x,y,z)$ 。若物体内的温度仅沿一个坐标方向发生变化,此温度场称为稳定的一维温度场 $t=f(x)$ 。温度场中同一时刻下相同温度各点所组成的面称为等温面。由于任何给定地点的温度不可能在同一时刻具有两个以上不同的值,因此不同温度的等温面绝不会彼此相交。

在等温面上,不存在温度差异,不可能有热量的传递,导热只能沿着等温面的法线方向,且朝着温度较低的一方进行(图 1-1)。将两等温面的温度差 Δt 和其间的垂直距离 Δx 之比的极限定义为温度梯度:

$$\text{grad}t = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{\partial t}{\partial x}$$

用偏导数 $\frac{\partial t}{\partial x}$ 的意义,是指不同等温面间的导热只须考虑其沿法线方向的温度差。温度梯度是向量,其方向垂直于等温面,并以温度增加的方向为正。对于稳定的一维温度场,温度梯度可表示为:

$$\text{grad}t = \frac{dt}{dx} \quad (1-1)$$

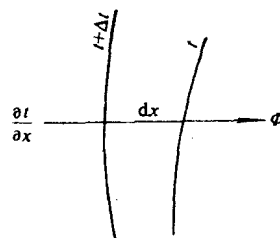


图 1-1 温度梯度和傅立叶定律

1.2.1.2 傅立叶定律

傅立叶定律是热传导的基本定律,它指出:单位时间内传导的热量与温度梯度及垂直于热流方向的截面积成正比,即:

$$d\Phi = -\lambda dA \frac{\partial t}{\partial x} \quad (1-2)$$

式中 Φ ——单位时间传导的热量,简称传热速率, W;

A ——导热面积,即垂直于热流方向的表面积, m^2 ;

λ ——物质的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

式(1-2)中的负号表示热流方向总是与温度梯度的方向相反。

1.2.2 导热系数

导热系数表征物质的导热能力,是物质的物理性质之一,其数值大小与物质的组成、结构、密度、温度及压力有关,由实验测定。工程计算中,常见物质的导热系数可从有关手册中查得。

1.2.2.1 固体的导热系数

在所有固体中,金属主要为自由电子导热,是最好的导热体。金属的导热系数一般随温度升高而降低,而随金属纯度的提高而增大,故合金的导热系数一般比纯金属低。

非金属的建筑材料和绝热材料的导热系数与其组成、结构的致密程度以及温度有关,通常随密度的增大或温度的升高而增加。

对于大多数匀质的固体, λ 值与温度大致成线性关系,即:

$$\lambda = \lambda_0(1 + \alpha t) \quad (1-3)$$

式中 λ, λ_0 ——固体在温度 t 及 0°C 时的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;

α ——温度系数,对大多数金属材料为负值,而对大多数非金属材料为正值, $1/^\circ\text{C}$ 。

应予指出,导热系数是温度的函数,但在工程计算中,常取其平均温度下的值,对于导热系数随温度呈线性变化的大多数固体物质的热传导计算,将不会引起太大的误差。

1.2.2.2 液体的导热系数

液体的导热系数一般比固体小。金属液体导热系数比非金属液体大,非金属液体中水的导热系数最大。除水和甘油外,绝大多数液体的导热系数随温度的升高而略有减小。溶液的导热系数低于纯液体的导热系数,当缺乏试验数据时,其值可按下式估算:

$$\text{有机化合物的水溶液} \quad \lambda = 0.9 \sum a_i \lambda_i \quad (1-4)$$

$$\text{互溶的有机混合液} \quad \lambda = \sum a_i \lambda_i \quad (1-5)$$

式中 a_i ——组分 i 的质量分率;

λ_i ——组分 i 的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

1.2.2.3 气体的导热系数

气体的导热系数最小,对导热不利,但有利于保温绝热。工业上所用的保温材料,就是因其空隙中有气体,故适宜于保温隔热。

气体的导热系数随温度升高而增大。在通常的压力范围内,其导热系数随压力变化很小,只有在过高或过低的压力(高于 $2 \times 10^5 \text{kPa}$ 或低于 3kPa)下,导热系数才随压力的增加而增大。

常压下气体混合物的导热系数用下式计算:

$$\lambda = \frac{\sum y_i M_i^{1/3}}{\sum y_i M_i^{1/3}} \quad (1-6)$$

式中 y_i ——气体混合物中组分 i 的摩尔分率;

M_i ——气体混合物中组分 i 的分子量。

1.2.3 平壁的稳定热传导

1.2.3.1 单层平壁的一维稳定导热

当平壁的长和宽各超过厚度的 10 倍时,从壁的边缘处损失的热可忽略,此时便可作大平壁处理,则其温度只沿垂直于壁面的 x 轴方向发生变化,即所有等温面都是垂直于 x 轴

的平面(图 1-2)。设平壁两侧面各维持在一定的温度 t_1 及 t_2 , 厚度为 b , 其 λ 不随温度而变(或取平均值)。对此种稳定的一维平壁导热, 导热速率 Φ 和传热面积 A 均为常量, 则式(1-2)可简化为:

$$\Phi = -\lambda A \frac{dt}{dx} \quad (1-7)$$

边界条件为: $x=0$ 时, $t=t_1$; $x=b$ 时, $t=t_2$; 且 $t_1 > t_2$, 积分上式得:

$$\Phi = \frac{\lambda}{b} A (t_1 - t_2) = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b}{\lambda A}} = \frac{\Delta t}{R} \quad (1-8)$$

或
$$q = \frac{\Phi}{A} = \frac{\Delta t}{R'} \quad (1-9)$$

式中 b ——平壁厚度, m;

Δt ——导热推动力, $^{\circ}\text{C}$;

R ——导热热阻, $^{\circ}\text{C}/\text{W}$;

q ——热通量, W/m^2 ;

R' ——导热热阻, $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

式(1-8)与电学中的欧姆定律类似, 它遵循自然界传递过程的普遍规律, 即

$$\text{过程速率} = \frac{\text{过程的推动力}}{\text{过程的阻力}}$$

例 1-1 某平壁厚度为 400mm, 若 $t_1=1000^{\circ}\text{C}$, $t_2=200^{\circ}\text{C}$, 平壁材料导热系数 $\lambda=0.9(1+0.001t)$ 。求导热系数为常量和变量时的温度分布关系式。

解 导热系数为常量时:

$$\text{平壁的平均温度 } t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{1000 + 200}{2} = 600(^{\circ}\text{C})$$

$$\text{平均导热系数 } \lambda_m = 0.9(1 + 0.001 \times 600) = 1.44(\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

$$\text{导热通量 } q = \frac{\lambda_m}{b} (t_1 - t_2) = \frac{1.44}{0.4} (1000 - 200) = 2880(\text{W}/\text{m}^2)$$

以 x 表示沿壁厚方向上的距离, 在 x 处等温面上的温度为 t , 稳定导热 q 值恒定, 则:

$$t = t_1 - \frac{qx}{\lambda_m} = 1000 - \frac{2880}{1.44}x = 1000 - 2000x$$

$$\text{导热系数为温度的函数时: } q = -0.9(1 + 0.001t) \frac{dt}{dx}$$

$$\text{分离变量积分 } \int_{t_1}^{t_2} 0.9(1 + 0.001t) dt = -q \int_0^b dx$$

$$-qb = 0.9(t_2 - t_1) + \frac{0.0009}{2}(t_2^2 - t_1^2) \quad (1-10)$$

$$\text{得 } q = \frac{0.9}{0.4} (1000 - 200) + \frac{0.0009}{2 \times 0.4} (1000^2 - 200^2) = 2880(\text{W}/\text{m}^2)$$

当 $b=x$ 时, $t_2=t$, 代入式(1-10)

$$-2880x = 0.9(t - 1000) + 0.00045(t^2 - 1000^2)$$

解得

$$t = -1000 + \sqrt{4 \times 10^6 - 6.4 \times 10^6 x}$$

计算结果表明, 将导热系数按常量和变量计算时, 所得导热通量是相同的, 故取平均温度下的导热系数值并将它作为常数处理, 在工程上是可行的; 而两种情况下的温度分布却不

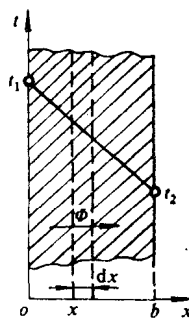


图 1-2 单层平壁导热

同,前者为直线,后者为曲线。

1.2.3.2 多层平壁的一维稳定导热

以三层平壁为例,如图 1-3 所示。假定:1)层与层之间接触良好,则接触面的两表面的温度相等;2)各层导热系数均为常量;3)各层厚度分别为 b_1 、 b_2 和 b_3 ;壁面积为 A ;导热系数分别为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 ;各表面温度分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 ,且 $t_1 > t_2 > t_3 > t_4$ 。在稳定导热过程中,通过各层的热量必相等,故按式(1-8)可得:

$$\Phi = \frac{t_1 - t_2}{\frac{b_1}{\lambda_1 A}} = \frac{\Delta t_1}{R_1}, \quad \Phi = \frac{t_2 - t_3}{\frac{b_2}{\lambda_2 A}} = \frac{\Delta t_2}{R_2}, \quad \Phi = \frac{t_3 - t_4}{\frac{b_3}{\lambda_3 A}} = \frac{\Delta t_3}{R_3}$$

由此可得:

$$\Phi = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3}{\frac{b_1}{\lambda_1 A} + \frac{b_2}{\lambda_2 A} + \frac{b_3}{\lambda_3 A}} = \frac{t_1 - t_4}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{\Delta t}{\sum_{i=1}^3 R_i}$$

推广到 n 层平壁:

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (1-11)$$

由式(1-11)可以看出,多层平壁导热的总推动力为各层推动力之和,即总温差;总热阻为各层热阻之和。

例 1-2 某平壁燃烧炉由三层材料组成,内层为耐火砖, $b_1 = 230\text{mm}$, $\lambda_1 = 1.0\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;外层为红砖, $b_3 = 240\text{mm}$, $\lambda_3 = 0.6\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;中间填有石棉隔热层, $b_2 = 50\text{mm}$, $\lambda_2 = 0.9\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。测得炉壁内外表面温度分别为 $t_1 = 900^\circ\text{C}$, $t_4 = 50^\circ\text{C}$ 。试求单位面积的热损失和红砖层的最高温度。

解 $q = \frac{\Phi}{A} = \frac{t_1 - t_4}{\frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \frac{b_3}{\lambda_3}} = \frac{900 - 50}{\frac{0.23}{1} + \frac{0.05}{0.9} + \frac{0.24}{0.6}} = 1240\text{W}/\text{m}^2$

红砖层的最高温度: $t_3 = t_4 + \frac{b_3}{\lambda_3} q = 50 + \frac{0.24}{0.6} \times 1240 = 546^\circ\text{C}$

1.2.4 圆筒壁的稳定热传导

工程上常遇见圆筒结构的设备,包括圆管道。此时由于圆筒的内外半径不等,热流穿过圆筒壁所经过的传热面积亦随半径而变。当圆筒长度 l 超过外径 r_2 的 10 倍时,在工程计算中,就可以看作是 $l \gg r_2$,接近于“无限长”的圆筒壁。当内、外壁温度各维持为等温 t_1 和 t_2 ,那么对于“无限长”圆筒壁来说,各个等温面都将是彼此同心的圆柱面,其表面积为 $A = 2\pi r l$ (参见图 1-4)。壁内温度分布成为轴对称的一维温度场,热朝着径向传递且沿途 Φ 值不变。根据傅立叶定律可写出:

$$\Phi = -\lambda(2\pi r l) \frac{dt}{dr}$$

分离变量积分 $\Phi \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2\pi l \lambda \int_{t_1}^{t_2} dt$

得 $\Phi = \frac{2\pi l \lambda (t_1 - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1-12)$

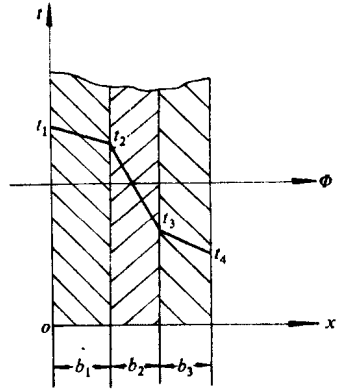


图 1-3 多层平壁的稳定热传导