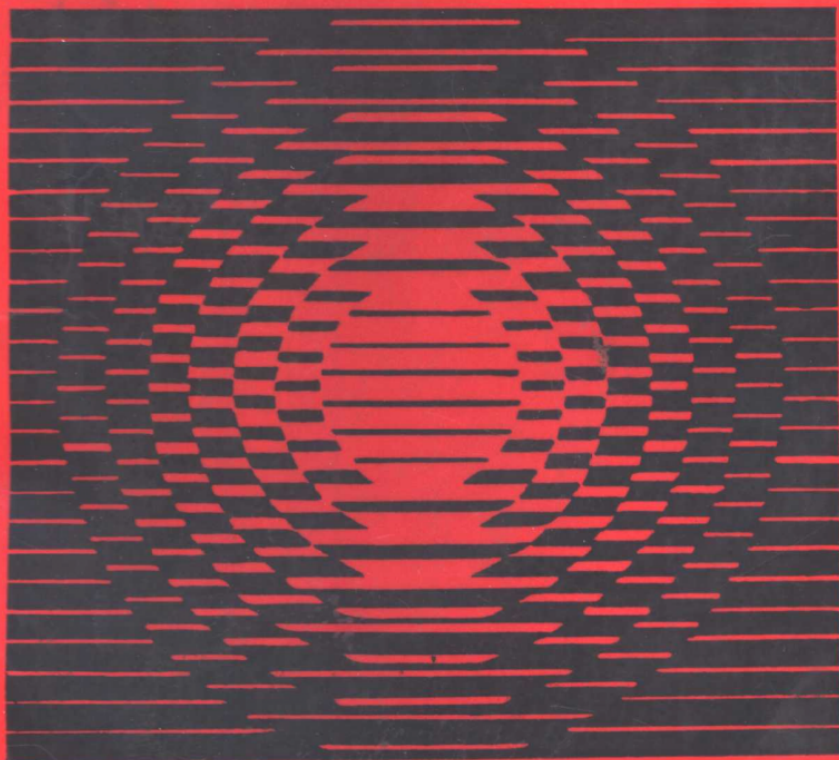


陶瓷设备 热平衡计算

于丽达 陈庆本 编著



81.532

9101473

陶瓷设备热平衡计算

于丽达 陈庆本 编著

轻工业出版社

内 容 简 介

本书较系统扼要地阐述了陶瓷热工设备的主要工作原理和计算方法,较详细地介绍了各种陶瓷热工设备的热平衡模式。通过计算及论证,寻求改善设备的结构和操作以达节省能源消耗和提高热效率的目的。本书可作为硅酸盐专业的教科书和工具书。

本书可供从事陶瓷、耐火材料及砖瓦等行业的工程技术人员和管理干部阅读,也可做为硅酸盐专业院校的教学参考书。

陶瓷设备热平衡计算

于丽达 陈庆本 编著

•

轻工业出版社出版

(北京安外黄寺大街甲3号)

(北京卫新印刷厂印刷)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

•

850×1168毫米 1/32 印张: 13²⁴/32 插页: 2 字数: 349千字

1990年8月 第一版第一次印刷

印数: 1-3,510 定价: 9.50元

ISBN7-5019-0697-1/TS·0453

前 言

本书从传热、干燥、烧成、燃料及燃烧等方面论述了陶瓷热工设备的工作原理及计算方法，较详细地介绍了各种热工设备的热平衡模式。利用热平衡分析方法，掌握热工设备的热能使用状况，以寻求改善设备热能利用的途径，达到提高热效率和节约能耗的目的。

全书分五章，各章内容既相互联系又保持一定的独立性，以便读者阅读。第一章简要叙述了传热原理及计算方法。第二章分别阐述了各种燃料的组成、热工特性及与燃烧过程有关的基本概念，并根据国家标准，对燃料及燃烧的计算方法进行了介绍，本章还介绍了多种燃烧设备的计算和选型方法。第三章内容为两大部分，一是热工设备热平衡的原则和方法，二是干燥过程、原理及干燥设备的热平衡计算。第四、五两章叙述了陶瓷热工设备的热平衡方法、手段、计算实例及分析，提供了一套较完整的模式。

在编写第四、五章时，参考了国内外有关热平衡的规范和模式，借鉴了日本、美国的方法，在不影响设备热工性能分析的前提下尽量简化繁琐的传热计算。

对热工设备进行热平衡分析是件重要的工作，在编写中，力求实际、科学、准确、易行，并做到统一测量方法和手段，统一热平衡模式。但这项工作还有待今后的标准化和规范化来完善。

本书选用了多种不同型式和结构的热工设备实例，其目的是使读者能较广泛地了解多种情况，更好地掌握各种设备热平衡计算和分析方法。

由于编者水平有限，编写中难免有缺点和错误，望读者能给

予指正。

全书主要由于丽达编写，陈庆本做了部分工作。在编写过程中，许鹤鸣同志给予了大力协助，也得到了其它各方面的支持和鼓励。沈慧贤、李国桢同志审阅了全稿，并提出不少宝贵意见，在此致以衷心的感谢！

编著者

目 录

第一章 传热计算	1
第一节 传导传热计算	1
一、稳定导热计算	1
二、不稳定导热计算	8
第二节 对流传热计算	14
一、牛顿冷却定律	14
二、流体自然流动时的对流传热系数	15
三、流体强制流动时的对流传热系数	16
第三节 辐射传热计算	18
一、斯蒂芬-波尔茨曼定律	19
二、两物体间的辐射传热计算	19
第四节 综合传热计算	22
一、两种流体间通过平壁传递热量	22
二、两种流体间通过圆筒壁传递热量	23
第二章 燃料、燃烧及燃烧设备	25
第一节 燃料的种类和组成	25
一、燃料的种类	25
二、固体燃料的组成	26
三、液体燃料的组成	32
四、气体燃料的组成	34
第二节 燃料发热量计算	36
一、高(位)发热量(Q_{GW})	36
二、低(位)发热量(Q_{DW})	44
第三节 燃料的燃烧计算	58
一、燃烧分析计算法	58

二、燃料燃烧计算经验公式.....	89
三、漏入空气量的计算.....	94
四、燃烧温度的计算.....	98
第四节 燃烧设备计算	102
一、燃料消耗量计算	102
二、固体燃料燃烧设备的热工计算	104
三、液体、气体燃料燃烧设备的热工计算	111
第三章 热平衡原则及干燥设备热平衡.....	140
第一节 热平衡类型.....	140
一、以供给体系的热源热量为基础的热平衡(供入热平衡)	141
二、以进入体系的全部热量为基础的热平衡(全入热平衡)	142
第二节 热工设备热平衡测算内容及步骤	143
一、陶瓷工业窑炉设备热平衡测算内容	143
二、热平衡原则方法	143
三、陶瓷工业窑炉设备热平衡步骤	144
第三节 干燥设备的物料衡算	151
一、湿空气的性质及其计算	151
二、干燥水分及所需空气量的计算	160
三、干燥器物料衡算	165
第四节 换热器热平衡	166
一、换热器热平衡模型	167
二、换热器热平衡测算内容	168
三、换热器热平衡计算公式	168
四、换热器热平衡实例	171
五、提高换热器热效率的途径	175
第五节 链式干燥机热平衡	178
一、链式干燥机热平衡模型	178
二、链式干燥机热平衡测算内容	179
三、链式干燥机热平衡主要计算公式	181
四、链式干燥机热平衡实例	187
第六节 室式干燥器热平衡	194

一、室式干燥器热平衡模型	195
二、室式干燥器热平衡测算内容	196
三、室式干燥器热平衡实例	196
第四章 隧道窑热平衡	206
第一节 隧道窑热平衡计算的一般方法	206
一、隧道窑热平衡模型	206
二、隧道窑热平衡测算内容	208
三、隧道窑热平衡主要计算公式	219
第二节 油烧隧道窑热平衡计算实例	235
一、油烧隧道窑热平衡模型	235
二、油烧隧道窑热平衡测算内容	237
三、油烧隧道窑热平衡计算	245
四、工艺有效热	254
五、热效率 η	256
六、能量利用率 η_3	257
七、热平衡结果分析和节能措施	257
第三节 煤烧隧道窑热平衡计算实例	264
一、煤烧隧道窑热平衡模型	265
二、煤烧隧道窑热平衡测算内容	265
三、煤烧隧道窑热平衡计算	271
四、工艺有效热	282
五、热效率 η	283
六、能量利用率 η_3	284
七、热平衡结果分析和节能措施	284
第四节 气烧隧道窑热平衡计算实例	291
一、气烧隧道窑热平衡模型	191
二、气烧隧道窑热平衡测算内容	294
三、气烧隧道窑热平衡计算	299
四、工艺有效热	306
五、热效率 η	308
六、能量利用率 η_3	309

七、热平衡结果分析和节能措施	309
第五节 提高隧道窑热效率的途径	311
一、采用合适的燃料	311
二、尽量减小空气过剩系数	314
三、改进窑体结构	316
四、加强隔热保温	318
五、余热利用	319
第五章 其它瓷陶热工设备热平衡	323
第一节 辊道窑热平衡	323
一、热平衡模型和测算内容	323
二、油烧烤花辊道窑热平衡计算	327
三、工艺有效热	332
四、热效率	333
五、热平衡结果分析和节能措施	333
六、提高辊道窑热效率的途径	335
第二节 间歇式窑炉热平衡	337
一、间歇式窑炉热平衡模型	337
二、间歇式窑炉测算内容和方法	337
三、间歇式窑炉热平衡计算公式	345
第三节 煤烧倒焰窑计算实例	355
一、煤烧倒焰窑热平衡模型	355
二、煤烧倒焰窑热平衡测算内容	355
三、煤烧倒焰窑热平衡计算	359
第四节 气烧梭式窑热平衡计算实例	379
一、气烧梭式窑热平衡模型	379
二、气烧梭式窑热平衡测算内容	380
三、气烧梭式窑热平衡计算	385
第五节 电炉热平衡	405
一、立式钼丝炉热平衡项目	406
二、立式钼丝炉热平衡测算内容	406
三、立式钼丝炉热平衡计算	466
主要参考资料	430

第一章 传热计算

在陶瓷工业窑炉中，传导、对流和辐射三种传热方式都存在。任何陶瓷工业窑炉的传热现象都可以分为两类，一类是用于加热物料的传热，如窑炉内高温火焰对物料的传热；另一类是导致热损失的传热，如窑体外壁散热。因此只有了解传热的基本规律，才能找到有效地减少热损失的方法。

第一节 传导传热计算

传导传热可分为稳定导热和不稳定导热两种基本情况。稳定导热是指物体中每一点的温度在任何瞬间都保持不变，即流入与流出物体的热流量相等。物体任何部分的焓既没有增加，也没有减少。连续运行的热工设备，象窑炉的炉壁、热交换器的管壁等就是这种情况。不稳定导热是指物体中各点的温度随时间而发生变化，流入与流出物体的热流量不相等，物体的焓发生变化。物体的加热、冷却属于不稳定导热现象。

一、稳定导热计算

1. 傅立叶定律

单位时间内传递的热量 Q 与传热面积 F 和温差 Δt 成正比，与厚度 δ (长度)成反比。且与材质有关。每小时通过单层平壁的热量可按式计算

$$Q = \frac{\lambda F}{\delta} (t_1 - t_2) \quad \text{W} \quad (1-1)$$

每小时通过 1m^2 单位面积所传递的热量可按式计算

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{t_1 - t_2}{\delta/\lambda} = \frac{t_1 - t_2}{R} \quad \text{W/m}^2 \quad (1-2)$$

式中 λ ——导热系数, $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$;

F ——平壁的面积, m^2 ;

t_1, t_2 ——平壁内、外表面的温度差, $^\circ\text{C}$;

δ ——壁厚, m ;

q ——热流密度, W/m^2 ;

R ——热阻, 等于单层平壁的厚度与导热系数之比 $\frac{\delta}{\lambda}$,

$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ 。

可以通过计算或直接测量的方法确定平壁内、外表面的温度。陶瓷窑炉砌筑材料的导热系数及其他物理性能见附表 1。

材料的导热系数随温度而变化, 计算时采用平均值 λ_{cp} , 当导热系数与温度之间是直线关系时, λ_{cp} 等于内、外壁温度的算术平均值时的导热系数。

〔例〕 已知隧道窑烧成带窑墙内表面温度为 1300°C , 外表面温度为 80°C , 窑墙厚为 0.45m , $\lambda_{cp} = 1.0 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, 烧成带窑墙面积为 45m^2 。

求: 每小时通过烧成带窑墙散失的热量。

〔解〕 每小时散失的热量

$$Q = \frac{\lambda F}{\delta} (t_1 - t_2) = \frac{1.0 \times 45}{0.45} (1300 - 80) = 122000 \text{ W}$$

2. 多层平壁的导热

陶瓷工业窑炉的炉墙都是由几层不同材料砌筑的, 在稳定状态下, 通过各层的热流都为定值, 即

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\delta_1/\lambda_1} = \frac{t_2 - t_3}{\delta_2/\lambda_2} = \frac{t_3 - t_4}{\delta_3/\lambda_3} = \frac{t_n - t_{n+1}}{\delta_n/\lambda_n}$$

根据和比定律可得:

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} \quad \text{W/m}^2 \quad (1-3)$$

或

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} \quad \text{W/m}^2 \quad (1-4)$$

同理

$$Q = \frac{(t_1 - t_{n+1})F}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} \quad \text{W} \quad (1-5)$$

$$Q = \frac{(t_1 - t_{n+1})F}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} \quad \text{W} \quad (1-6)$$

式中 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ ——分别为各层壁厚度, m,

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ——分别为各层壁的导热系数, $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

在计算时要先求出交界面温度 $t_2, t_3, \dots, t_n$, 据此计算出各层材料的平均导热系数 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 最后才能计算出传导的热量, 可用尝试误差法求解。

〔例〕 已知某窑炉窑墙用密度为 2.2kg/m^3 的高铝砖和密度为 0.75kg/m^3 的轻质硅藻土砖砌成, 厚度均为 230mm , 窑墙内外表面温度分别为 1400°C 和 100°C , 轻质硅藻土砖的允许使用温度为 900°C 以下。

求: 交界面温度是否超过轻质硅藻土砖的最高允许使用温度。

〔解〕 先假设高铝砖与轻质硅藻土砖交界面温度为 1000°C 。根据书末附表1, 可得高铝砖和轻质硅藻土砖的导热系数 λ_1 和 λ_2 分别为:

$$\lambda_1 = 1.52 - 19 \times 10^{-5} \times \frac{1400 + 1000}{2} = 1.292 \quad \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_2 = 0.169 + 35 \times 10^{-5} \times \frac{1000 + 100}{2} = 0.362 \quad \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

据式(1-3):

$$q = \frac{1400 - 100}{\frac{0.23}{1.292} + \frac{0.23}{0.362}} = 1598 \text{ W/m}^2$$

由于交界面温度是假设的，必须计算校验。据式(1-2)：

$$t_2 = t_1 - q \frac{\delta_1}{\lambda_1} = 1400 - 1598 \times \frac{0.23}{1.292} = 1116^\circ\text{C}$$

求出的温度与假设的不符，说明假设温度不正确。重新假设交界面温度为1116℃，则：

$$\lambda_1 = 1.52 - 19 \times 10^{-5} \times \frac{1400 + 1116}{2} = 1.281 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_2 = 0.169 + 35 \times 10^{-5} \times \frac{1116 + 100}{2} = 0.382 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

据式(1-3)：

$$q = \frac{1400 - 100}{\frac{0.23}{1.281} + \frac{0.23}{0.382}} = 1663 \text{ W/m}^2$$

$$t_2 = 1400 - 1663 \times \frac{0.23}{1.281} = 1102^\circ\text{C}$$

与假设温度1116℃相近，故第二次计算结果正确，因此，交界面温度已经超过轻质硅藻土砖的允许使用温度，轻质硅藻土砖在此条件下使用不适宜。

3. 单层圆筒壁的导热

每小时通过单层圆筒壁的热量可按下式计算：

$$Q = \frac{2\pi\lambda l}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (t_1 - t_2) = \frac{2.729\lambda l}{\lg \frac{d_2}{d_1}} (t_1 - t_2) \text{ W} \quad (1-7)$$

式中 d_1, d_2 ——圆筒壁的内、外直径，m；

t_1, t_2 ——圆筒壁内外表面温度，℃；

λ ——筒体的导热系数，W/m·℃；

l ——筒体的长度，m。

每小时通过1m长单层圆筒壁的热量可按下式计算：

$$Q = \frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (t_1 - t_2) = \frac{2.729\lambda(t_1 - t_2)}{\lg \frac{d_2}{d_1}} \text{ W} \quad (1-8)$$

〔例〕 已知烟囱内表面温度为280℃，外表面温度为40℃，烟囱内径为0.85m，外径为1.7m，红砖的密度为2.0kg/m³。

求：每小时通过1m长红砖砌烟囱壁散失的热量。

〔解〕 查书末附表1可得红砖的导热系数

$$\lambda = 0.81 + 4.7 \times 10^{-4} \times \frac{280 + 40}{2} = 0.89 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

据式(1-8)，每小时通过1m长单层圆筒壁的热量为：

$$Q = \frac{2.729 \times 0.89 \times (280 - 40)}{\lg \frac{1.7}{0.85}} = 1937 \text{ W}$$

4. 多层圆筒壁的导热

每小时通过1m长多层圆筒壁传导的热量可按下式计算：

$$Q = \frac{2.729(t_1 - t_{n+1})}{\frac{1}{\lambda_1} \lg \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \lg \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \lg \frac{d_{n+1}}{d_n}} \text{ W} \quad (1-9)$$

也可用下式简化计算

$$Q = \frac{\pi(t_1 - t_{n+1})}{\frac{d_2 - d_1}{d_2 + d_1} \times \frac{\varphi_1}{\lambda_1} + \frac{d_3 - d_2}{d_3 + d_2} \times \frac{\varphi_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_{n+1} - d_n}{d_{n+1} + d_n} \times \frac{\varphi_n}{\lambda_n}} \text{ W} \quad (1-10)$$

式中 φ ——弯曲修正系数，其值取决于内外直径比 $\frac{d_{n+1}}{d_n}$ ，可由表

1-1查得。

〔例〕 已知管道内蒸汽的温度为650℃，管道外径为250mm，管道外包有两层，一层是矿渣棉保温层，保温层外是20mm厚的石棉硅藻土灰泥层，其 $\lambda = 0.17 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ，要求每小时每米蒸汽管道上的热损失不得大于450W，保护层表面温度不得高于43℃。

求：保温层厚度。

〔解〕 据式(1-9)得：

表1-1

弯曲修正系数 φ 值

$\frac{d_{n+1}}{d_n}$	φ	$\frac{d_{n+1}}{d_n}$	φ	$\frac{d_{n+1}}{d_n}$	φ	$\frac{d_{n+1}}{d_n}$	φ
1.0	1.000	1.5	1.014	2.0	1.040	3.0	1.099
1.1	1.001	1.6	1.018	2.2	1.050	3.5	1.129
1.2	1.0025	1.7	1.024	2.4	1.061	4.0	1.152
1.3	1.005	1.8	1.030	2.6	1.074	5.0	1.208
1.4	1.009	1.9	1.035	2.8	1.087	6.0	1.255

$$450 = \frac{2.729 \times (500 - 43)}{\frac{1}{0.1} \lg \frac{250 + 2\delta}{250} + \frac{1}{0.17} \lg \frac{250 + 2 \times 20 + 2\delta}{250 + 2\delta}}$$

解此方程得保温层厚度为：

$$\delta = 100 \text{ mm}$$

5. 形状不规则物体的导热

对几何形状接近于平壁、圆筒壁的物体，可按下列式计算：

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F_x (t_1 - t_2) \quad \text{W} \quad (1-11)$$

式中 λ ——物体的导热系数， $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ ；

δ ——壁厚， m ；

t_1, t_2 ——物体两壁面温度， $^\circ\text{C}$ ；

F_x ——该物体的当量面积， m^2 ，可根据物体的形状按下述方法计算：

(1) 对两侧面积不等的平壁或 $\frac{F_2}{F_1} \leq 2$ 的圆筒壁，其当量面积为：

$$F_x = \frac{F_1 + F_2}{2} \quad \text{m}^2 \quad (1-12)$$

式中 F_1, F_2 ——分别为该物体内部、外两侧表面积， m^2 。

(2) 对接近于圆筒壁的物体，例如方形管道的保温层，其当量面积为：

$$F_x = \frac{0.43(F_1 + F_2)}{\lg \frac{F_2}{F_1}} \text{ m}^2 \quad (1-13)$$

(3) 对长、宽、高三个方向上尺寸相近的中空物体，例如形状近似于中空球壁的物体，其当量面积为：

$$F_x = \sqrt{F_1 \cdot F_2} \text{ m}^2 \quad (1-14)$$

(4) 对中空正、长方体的边角和端角

由两面墙壁相交而成的墙角称边角，由三面墙壁相交而成的角称端角，其当量面积为：

$$\text{边角：} F_x = 0.54 \cdot \delta \cdot y \text{ m}^2 \quad (1-15)$$

$$\text{端角：} F_x = 0.15\delta^2 \text{ m}^2 \quad (1-16)$$

式中： δ ——边角厚度，m；

y ——边角长度，m。

由此可以计算中空长方体例如燃室的当量面积。任何一个中空长方体都有12个边角，8个端角，其中每4个的 y 值相同，因此，如果内壁的尺度分别用 y_1 、 y_2 、 y_3 来表示，则整个中空长方体的当量面积应为：

$$\begin{aligned} F_x &= F_1 + 4 \times 0.54\delta(y_1 + y_2 + y_3) + 8 \times 0.15\delta^2 \\ &= F_1 + 2.16\delta(y_1 + y_2 + y_3) + 1.2\delta^2 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (1-17)$$

表1-2

中空正方体的核算面积

形 状	F_x
全部 y 尺寸 $>10\delta$	$\frac{F_1 + F_2}{2}$
全部 y 尺寸 $<\frac{\delta}{5}$	$0.79\sqrt{F_1 F_2}$
三个 y 尺寸中： $y_1 < \frac{\delta}{5}$ ，而 $y_2, y_3 > \frac{\delta}{5}$	$F_1 + 1.86\delta(y_2 + y_3) + 0.35\delta^2$
三个 y 尺寸中： $y_1, y_2 < \frac{\delta}{5}$ ，而 $y_3 > \frac{\delta}{5}$	$\frac{2.78y_3\delta}{\lg \frac{F_2}{F_1}}$

上式适用于所有 y 尺度 $>\frac{\delta}{5}$, 但 $\leq 10\delta$ 的场合, 当 $y<\frac{\delta}{5}$ 时, 可以从表1-2中查得相应的计算式。

二、不稳定导热计算

不稳定导热过程与物体焓的变化有关, 焓的变化速度又与材料的导热能力(即导热系数 λ)成正比, 而与其蓄热能力(即容积热容量 $C\rho$)成反比。所以不稳定状态下导热过程的速度应取决于物体的导温系数 $a(a = \frac{\lambda}{C\rho})$ 。

关于不稳定导热的问题, 可以用数学分析法求解, 但只在某些

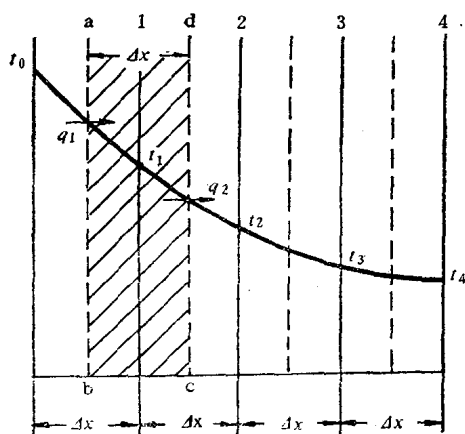


图1-1 差量法计算图解

些边值条件下才是可能的。如果情况较为复杂, 例如开始加热前, 物体内部温度原来就不是均匀一致的, 或表面温度随时间而任意改变, 且其改变速度不是常数等等, 此时就很难用数学分析法求解。因此, 在实际工程计算中常采用有限差量法。

这种方法的基础是以不连续的增量来表示

空间或时间上连续变化的过程。

设平壁的厚度为 δ , 沿厚度方向分成相等的若干层, 每层厚度等于 Δx , 则总层数为 $m = \frac{\delta}{\Delta x}$ 。如果平壁处于加热过程中, 若热流从左边向右边传递, 则它具有图1-1所示的温度场。