

高等学校教学用书

普通冶金炉

下 册

北京钢铁学院冶金炉教研组编



中国工业出版社

編 者 的 話

自1952年教学改革以后，各院校冶金爐課程所采用的教材大多是以苏联 M. A. 格林科夫教授等集体編著的冶金爐試用教本为基础。該書內容丰富，反映了苏联和世界的科学成就。但內容涉及較广較深，同时有些地方不能結合我国的实际情况。因此，編写一本能反映我国实际情况和我国科学水平的冶金爐教科書就十分必要了。

本着这一目的，我們教研組响应党的号召，根据几年来的教学經驗，編写一本冶金爐試用教科書作为向我們偉大祖国建国十周年国庆的献礼。

本書以教研組現用的講义为藍本并根据黑色冶金各专业的教学大綱加以补充和修改，在本書的編写过程中注意到了1958年的教育革命后要求教材必須更密切地联系中国实际以及教学上的一些特点，对某些章节作了較詳細的闡述，并在書中收集了一些現場的先进經驗。

本書分上下两册出版，內容包括以下几篇：

1. 燃料及燃燒計算——主要講述燃料燃燒計算，燃料的来源、特性以及燃料的选择和管理；
2. 筑爐材料——主要講述各种筑爐材料的性質、选择及簡單的制造技术；
3. 气体力学和相似原理——主要講述气体在管道和各种冶金爐內的运动規律，气体流动的阻力計算及相似理論的基本原理；
4. 傳热原理——講述冶金爐內傳热的基本規律及其計算；
5. 爐子构造的一般原理——主要講述各种爐子的热工特征及其設計原則；
6. 冶金爐的构造及其附屬設備——講述冶金爐的构造特

点，爐子的附屬設備及其選用。

參加本書編写工作的有：

序言	倪学梓
燃料及燃燒計算	王世均、韓昭滄（燃料管理）
筑爐材料	陈鴻复
气体力学	倪学梓
相似原理	徐业鵬
傳热原理	張鳳祿、韓昭滄（不穩定态傳热）
爐子构造的一般原理	高仲龙
冶金爐的构造及其附屬設備	邱国仕、徐业鵬（廢热利用設備、干燥爐）
韓昭滄（燃燒裝置）、馮世修（冶金爐的砌筑和維護）	

本書由倪学梓、韓昭滄二人审校。

本書的大綱和初稿虽經多次討論和修改，但由于受到時間短促和編者水平的限制，难免有錯誤和不当之處。編者恳切地希望讀者，尤其是各院校的兄弟教研組提出寶貴的意見和批評，以便再版時加以修改，使之成为較完善的冶金爐教科書。

本書可作为高等学校黑色冶金各專業的試用教材，亦可供有色冶金專業、冶金中等技术学校以及冶金爐热工工作者参考。

——編 者

目 录

第四篇 傳热原理

第十九章 緒 論	7
第二十章 穩定态傳导傳热	11
§1. 傅立叶定律	11
§2. 导热系数	12
§3. 通过平壁的导热	14
§4. 圓筒壁的导热	19
§5. 球壁的导热	21
§6. 不規則形状物体的导热	23
第二十一章 对流給热	24
§1. 对流給热的本質	24
§2. 热交換的水力学原理	27
§3. 相似原理在对流給热上的应用	31
§4. 对流給热系数的經驗公式	38
§5. 对流給热在冶金爐上的应用	46
第二十二章 輻射傳热	48
§1. 基本概念	48
§2. 輻射的基本定律	51
§3. 灰体的輻射	55
§4. 克希荷夫定律	57
§5. 两个物体間的輻射热交換	59
§6. 为理想圍壁連在一起的两个表面之間的輻射热交換	71
§7. 气体与固体之間的輻射热交換	74
第二十三章 綜合热交換	86
§1. 对流和輻射同时存在时的綜合热交換	86

§2. 通过平壁从一气体到另一气体的傳热	87
§3. 通过圓形壁从一气体到另一气体的傳热	89
§4. 火焰爐爐膛內的热交換	91
第二十四章 不稳定态傳导傳热	99
§1. 概述	99
§2. 單值条件	100
§3. 第一类边界条件下不稳定态傳导傳热的 分析解法	102
§4. 第二类边界条件下不稳定态傳导傳热的 分析解法	115
§5. 第三类边界条件下不稳定态傳导傳热的 分析解法	118
§6. 有限差量法 (E. 斯密德圖解計算法)	129
§7. 导热性为无限大的物体的加热計算法	133
参考文献	136

第五篇 爐子构造的一般原理

第二十五章 緒論	137
§1. 冶金爐的主要类型	137
§2. 对爐子的基本要求	140
§3. 爐子理論的發展	141
第二十六章 爐子的热工作	147
§1. 火焰爐爐膛热交換	147
§2. 豎爐內的热交換	170
第二十七章 爐子的热平衡和燃料消耗量的計算	178
第二十八章 爐子的設計和計算	192
参考文献	202

第六篇 冶金爐构造及其附屬設備

第二十九章 冶金爐的組成部分	204
§1. 爐膛	204

§2. 爐門及其提升裝置	208
§3. 爐子的金屬构架	209
§4. 烟道、閘門和烟囪	215
第三十章 燃燒裝置	219
§1. 概述	219
§2. 固体燃料的燃燒裝置	219
§3. 液体燃料的燃燒裝置	229
§4. 气体燃料的燃燒裝置	240
第三十一章 廢熱利用設備	258
§1. 換熱器	261
§2. 蓄熱室	299
§3. 廢熱鍋爐〔17〕	315
第三十二章 加熱爐	318
§1. 鋼的加熱技術	318
§2. 軋鍛用室狀加熱爐	336
§3. 連續加熱爐	341
§4. 均熱爐	361
第三十三章 熱處理爐	368
§1. 熱處理爐構造的特点	368
§2. 直接加熱的熱處理爐	372
§3. 間接加熱的熱處理爐	382
§4. 浴爐	389
§5. 保護氣體和無氧化加熱	391
第三十四章 干燥爐	396
§1. 干燥过程	396
§2. 干燥爐	400
第三十五章 冶金爐的砌筑與修理	408
§1. 主要筑爐材料的性質和用途	408
§2. 爐子砌磚的一般原則	413

§3. 冶金爐的修理	430
§4. 煙囪的建築和修理	435
參考文獻	438
附 錄	440

第四篇 傳热原理

第十九章 緒 論

傳热学是一門研究热的傳播过程的學問。傳热过程出現在各种不同的技術領域內，而且起着很大的作用。在冶金爐內進行着各式各樣極其複雜的傳热过程，因此掌握傳热的規律，對於爐子的設計及其操作具有極為重大的意義。

爐子作為一個熱工設備其主要任務是在爐內進行金屬的加熱或熔煉；大多數的爐子還設有空氣（或煤氣）預熱裝置，將廢氣從爐膛帶出的余熱進行回收以加熱空氣（或煤氣）；此外，通過爐牆、爐門還會向四周散失熱量。在前兩種情況下，我們應採取措施強化傳热过程，而對於後者卻恰恰相反，應設法使之減少。強化爐內及預熱設備中的熱交換过程，並降低通過爐體的散熱損失，不僅縮短金屬的加熱或熔化時間，同時也降低了燃料消耗和金屬成本。

因此，必須掌握爐內所進行的各種傳热过程的基本規律以及熱交換量的計算方法。

傳热的基本概念

1. 溫度場

傳热过程與溫度的分布有着不可分割的關係。被加熱或冷卻的物體內，各點的溫度可能是不同的，即使對同一點來說，其溫度也可能隨時間而變。因此，在一般情況下，溫度 t 是座標 x , y , z 和時間 τ 的函數，即： $t=f(x, y, z, \tau)$ (19-1)

在某一瞬間，物體或空間內所有各點溫度的綜合，稱為溫度場，上式 (19-1) 就是溫度場的數學表达式。

如果各點溫度隨時間而變，亦即 $\frac{\partial t}{\partial \tau} \neq 0$ ，那麼這種溫度場

就称为不稳定温度場。反之，如果各点温度不随時間而变，即

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0, \text{ 便称为稳定温度場。}$$

温度場可以是三个座标、两个座标或一个座标的函数，所以温度場又可区分为三向、二向或單向的温度場。單向稳定温度場的方程式具有最簡單的形式： $t=f(x)$ 。

2. 温度梯度

在物体或空間內总有一些点具有同一的温度，具有相同温度的各点所組成的面叫做等温面。因为空間內同一点不可能同时具有两个不同的温度，所以不同温度的等温面絕不会彼此相交。

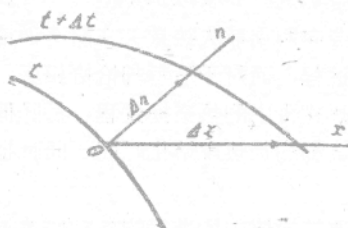


圖19—1 关于温度梯度的定义

从任意一点 O 沿等温面移动沒有温度的变化，只有在穿过等温面的方向（例如圖 19—1 中的 x 方向）才能观察到物体内部温度的改变。同时，最显著的温度变化是在等温面的法綫 n 方向，相邻两等温面之温度差 Δt 与沿法綫方向两等温面之間距离 Δn 的比值的極限叫做温度梯度，即：

$$\lim \left(\frac{\Delta t}{\Delta n} \right)_{\Delta n \rightarrow 0} = \frac{\partial t}{\partial n} \text{ } ^\circ\text{C/米。}$$

溫度梯度的数值等于在和等温面垂直的單位距离上温度改变的数量，它表示温度变化的强度。

溫度梯度是一种沿等温面法綫方向的向量，从低温到高温的

方向为正，負的温度梯度叫做“温度降度”。

3. 热流

如果在物体內或空間內有温度差存在，則热流便从温度較高的部分流向低温部分。通常对于單位時間內通过單位面积所傳遞的热量称为热流，一般都用符号 q 来表示，其單位为千卡/米²·小时。热流也是一个向量，其正負方向恰与温度梯度相反。

4. 傳热的不稳定态和稳定态

如上所述，温度場可分为不稳定的和稳定的两种，假若在某傳热过程中它的温度場为不稳定的，亦即物体或空間內所有各点的温度随時間而变，即 $\frac{\partial t}{\partial \tau} \neq 0$ ，因而通过各点的热流也随時間而异（ $\frac{\partial q}{\partial \tau} \neq 0$ ），这种傳热現象就叫做不稳定态傳热。金屬的加热或冷却就屬於此种情况。反之，若在傳热过程中，其温度場是稳定的，即 $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ ，因而 $\frac{\partial q}{\partial \tau} = 0$ ，这种傳热現象就叫做稳定态傳热，屬於这种情况的例子如在正常操作下連續加热爐通过爐墙的散热。

5. 傳热的三种基本方式

冶金爐內所进行的一切复杂傳热过程都不外乎下列三种本質不同的傳热方式，即傳导、对流和輻射。

傳导：热量直接由物体的一部分傳至另一部分，或由一物体直接傳至与其相邻的另一物体，而无需質点的移动者，屬於傳导傳热。傳导傳热在固体、液体和气体中都可能發生，在液体和固体（介电質）中，热量的轉移是依靠彈性波的作用，而在气体中則依靠原子或分子的扩散，在金屬內部則依靠自由电子的扩散。

对流：这种傳热方式只能在液体或气体中出现。由于流体不同的部分發生相对位移，使不同部分的質点相互混合或由于質点的运动而与另一固体表面接触而进行热量交换者都屬对流傳热。

輻射：輻射傳热是一种由电磁波来傳播热量的过程，它与傳

导和对流有着本質的区别。物体受热后向各个方向放射輻射能，当輻射能投射到另一物体时便部分地被吸收，然后又轉变为热能而将其加热，因此这种傳热方式不仅进行能量的轉移，而且还伴随着能量形式的轉化。

6. 傳热的一般条件

应当注意，实际上在冶金爐中每种傳热方式并非单独存在，絕大多数情况下常常是一种形式伴随着另一种形式同时出現。从某物体将热量傳遞至另一物体的全部現象称为綜合热交换。不同傳热現象可能是由不同基本傳热方式所組成，然而一切傳热方式还有它們的共同性，并服从一般的計算公式。在同一物体內或两个物体間，只有存在温度差时才可能發生傳热过程。并且热流的方向总是从高温到低温，同时，对于任何傳热过程，其热交换量都与温度差 Δt 、傳热面积 F 及傳热時間 τ 成正比，即

$$Q \propto \Delta t F \tau$$

$$\text{或} \quad Q = K(t_1 - t_2) F \tau \quad \text{仟卡} \quad (19-2)$$

这一公式就是傳热的通式，因为它适用于所有各种傳热現象，式中系数 K 称为傳热系数，它代表温度差等于 1°C ，面积等于 1 米^2 时，每小时的傳热量。

根据傳热条件的不同，傳热系数可以是总括的，包括多种傳热方式，也可以是部分的，即只代表某一种傳热方式。傳热系数的倒数 $\frac{1}{K}$ 叫做热阻，用 R 表示。

$$\text{因而} \quad q = \frac{\Delta t}{R} \quad \text{仟卡/米}^2 \cdot \text{小时}$$

由此可見，热流与温度差成正比，而与热阻成反比。这与导电現象是类似的。

第二十章 稳定态传导传热

如前所述，传导传热在固体、液体及气体中都可能发生，然而在固体中这种传热方式意义最大。

在冶金炉中传导传热的意义尤为重大，例如通过连续加热炉炉墙的散热，通过换热器壁的传热以及金属的加热或冷却等都属于传导传热。前两种情况属于稳定态传导传热，而后者属于不稳定态传导传热。本章将研究稳定态传导传热。

§ 1. 傅立叶定律

傅立叶研究了固体的导热现象后，确定了所傳遞的热量与温度梯度、时间和垂直于热量传播方向的截面积成正比，如果计算每单位时间内每单位面积所傳遞的热量，那么就可以把所确定的关系式写成：

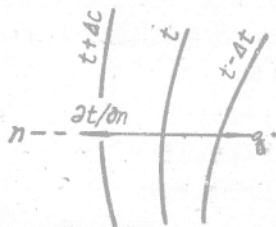


圖 20—1

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \text{ 仟卡/米}^2 \cdot \text{小时} \quad (20-1)$$

式 (20—1) 就是传导传热基本定律的数学式，称为傅立叶定律。

式中 λ 为比例系数，称为导热系数，由于热流与温度梯度的方向相反（见图 20—1），所以在式中加一负号。

§ 2. 导热系数

导热系数是物質的一种物理性質，它說明物質的导热能力，其單位可由式 (20—1) 导出：

$$\lambda = \frac{q}{\frac{\partial t}{\partial n}} = \frac{Q}{F \tau \Delta t / l} \quad \frac{\text{千卡}}{\text{米}^2 \cdot \text{小时} \cdot ^\circ\text{C} / \text{米}} \text{ 或 } (\text{千卡} / \text{米} \cdot \text{小时} \cdot ^\circ\text{C})。$$

由此可見，导热系数的大小乃是單位時間內，当單位距离上的温度差为 1°C 时，每單位表面积所能通过的热量。

各种物質的自然本質及化学成份不同，其导热系数是不同的。即使对于同一物質，其导热系数也是随着物質的結構（重量、孔隙度）、温度、压力和湿度而改变。

各种物質的导热系数都是用实验方法测定的。

因为物体在加热时其各部的温度不一样，所以就必須知道导热系数随温度而改变的規律。导热系数与温度之間的真正关系是复杂的。工程計算中为了方便起見認為 λ 与 t 成直綫关系：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_t &= \lambda_0 + bt \\ \text{或} \quad \lambda_t &= \lambda_0 (1 + \beta t) \end{aligned} \right\} \quad (20-2)$$

式中 λ_t —— $t^\circ\text{C}$ 时的导热系数

λ_0 —— 0°C 时的导热系数

b 或 β —— 温度系数，視不同材料而定。

在实际計算中，导热系数是取物体平均温度下的数值，并且就把这一数值当作常数处理，例如物体两端的温度为 t_1 和 t_2 ，其平均导热系数为：

$$\lambda_{\text{均}} = \lambda_0 + b t_{\text{均}} \quad (20-3)$$

$$t_{\text{均}} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

一、金屬的导热系数：金屬的导热系数最大 ($\lambda_0 = 2-360$ 千卡/米·小时· $^\circ\text{C}$)。金屬中最好的导热体是銀 ($\lambda_0 = 360$ 千卡/米·小时· $^\circ\text{C}$)，

其次是銅 ($\lambda_0=340$)，鐵 ($\lambda_0=61.9$) 及鉛 ($\lambda_0=30.3$) 的導熱性最不好。溫度升高時大多數金屬的導熱性降低 (見圖20—2)。金屬的導熱性與導電性有直接的關係，因為導熱與導電性都同樣取決於自由價電子，所以各種純金屬的導熱系數與導電系數之間的比例是一個常數 (維捷曼——傅朗茨定律)。如金屬內加入任何雜質，其導熱系數便隨之降低。

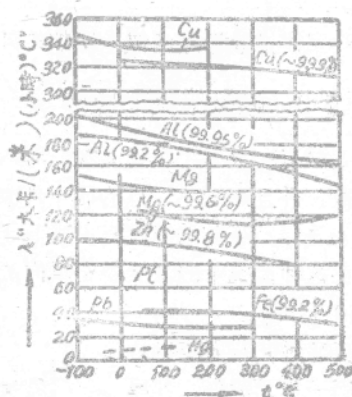


圖20—2 各種金屬的導熱系數與溫度的關係

此外，金屬的導熱性還與金屬的組織有關。

二、各種建築材料和絕熱材料的導熱系數：這一類材料的導熱系數的數值是從 $\lambda_0=0.02$ 到 $\lambda_0=2.5$ 千卡/米·小時· $^\circ\text{C}$ 。溫度升高時除鑽石外導熱系數都隨之而增大。材料的結構對 λ 也有很大的影響，在一些多孔材料中，各種傳熱方式的共同作用代替了單純的導熱。並且孔隙度越大和孔隙越小，則其導熱系數便相應減小。此外，材料的濕度也對材料的導熱系數有影響，例如干磚料的導熱系數 $\lambda_0=0.3$ ，水的導熱系數 $\lambda_0=0.5$ ，而濕磚料的導熱系數 $\lambda_0=0.9$ 。凡導熱系數很低，小於 0.2 千卡/米·小時· $^\circ\text{C}$ 的材料叫做絕熱材料。

三、液体的导热系数：液体导热系数的数值从 $\lambda_0 = 0.08$ 到 $\lambda_0 = 0.6$ 千卡/米·小时·°C，温度升高时，除水和甘油外，大多数液体的导热系数反而减小。

四、气体的导热系数：气体的导热系数的数值从 $\lambda_0 = 0.005$ 到 $\lambda_0 = 0.5$ 千卡/米·小时·°C，温度升高时， λ 随着增大。

应当注意，在气体或液体中的传导传热与固体一样仍服从传导传热的基本定律。

现在根据傅立叶定律推导稳态态传导传热的计算公式。

§ 3. 通过平壁的导热

一、單層平壁 設有一單層平壁（圖20—3），壁厚为 S ，材料的导热系数为常数，并且等于 λ ，壁的两个外表面各保持一定温度 t_1 和 t_2 ，并且 $t_1 > t_2$ ，平壁的温度只沿垂直于壁面的 x 轴方向发生变化。因此在这种情况下温度场是單向的，所有等温面都是平面，并且垂直于 x 轴。

現在我們來計算通过此單層平壁的热流。从平壁内划出一單元薄層，其厚度为 dx ，温度差为 dt ，根据傅立叶定律，通过此單元層的热流为：

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{小时}$$

分离变量后，即得：

$$dt = -\frac{q}{\lambda} dx$$

将上式积分

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = -\int_{x=0}^{x=S} \frac{q}{\lambda} dx$$

积分后得到

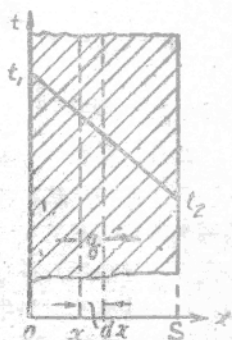


圖20—3 單層平壁的导热

$$t_1 - t_2 = \frac{q}{\lambda} S$$

所以：

$$q = \frac{\lambda}{S} (t_1 - t_2) \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{小时} \quad (20-4)$$

由此可見，在每小時內，平壁每平方米面積所傳遞的热量与导热系数 λ 及平壁两表面的温度差成正比，而与平壁厚度 S 成反比。应当指出，热流的大小不是取决于温度的绝对数值，而是取决于温度差。

若平壁的面积为 F ，那末在 τ 時間內通过 F 面积的热量等于：

$$Q = \frac{\lambda(t_1 - t_2)F \cdot \tau}{S} \text{ 千卡} \quad (20-5)$$

此式也可写成如下形式

$$Q = \frac{(t_1 - t_2)F \cdot \tau}{\frac{S}{\lambda}} \text{ 千卡}$$

上式中 $\frac{S}{\lambda}$ 代表平壁的热阻，可用符号 R 表示，热阻的倒数 $\frac{1}{R} = K$ ，在这里系数 K 叫做传导传热系数，如将 K 值代入上式，便得到如下的形式：

$$Q = K(t_1 - t_2)F\tau \text{ 千卡} \quad (20-6)$$

K 的量綱为千卡/米²·小时·°C，它表示当平壁整个厚度的温度差等于 1°C，在 1 小時內通过面积为 1 米²，厚度为 S 米的器壁的热量。

現在我們研究一下平壁內温度的分布情况。由于 $-\frac{dt}{dx} = \frac{q}{\lambda}$ ，并且在穩定态时热流 q 保持一定，那么在 $\lambda = \text{常数}$ 时温度梯度也保持不变。所以在平壁內温度的分布便是一条直線。当

平壁內 λ 随温度变化时, 温度的分布情况便不是一条直线, 而是曲线。如图 20—4 所示, 曲线 1 相当于 λ 随温度升高而增大的情况; 曲线 3 相当于 λ 随温度升高而减小的情况。

例 試求 1 小时內 1 米² 平爐爐墙通过的热量, 爐墙由硅磚砌成, 厚度 $S=370$ 毫米, 爐墙內表面温度 $t_1=1650^\circ\text{C}$, 外表面 $t_2=300^\circ\text{C}$ 。硅磚 $b=0.00065$ 。

按式 (20—3) 参考本書附录 4 求 $\lambda_{\text{均}}$

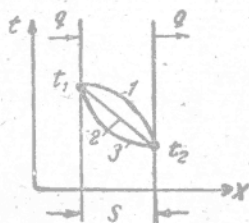


圖20—4 当 $\lambda=f(t)$ 时, 平壁內温度的分布

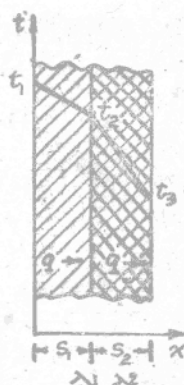


圖20—5 双層平壁的导热

$$\lambda_{\text{均}} = 0.7 + 0.00065 \times \frac{1650 + 300}{2} = 1.333 \text{ 千卡/米} \cdot \text{小时} \cdot ^\circ\text{C}.$$

根据式 (20—4) 当 $F=1 \text{ 米}^2$, $\tau=1 \text{ 小时}$

$$q = \frac{1.333 \times (1650 - 300)}{0.37} = 4870 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{小时}.$$

二、双層及多層平壁 設有两个不同材料的平壁紧密連接, (見圖20—5), 其間沒有縫隙, 其厚度各为 S_1 和 S_2 , 导热系数都为常数并且各为 λ_1 和 λ_2 , 两外表面的温度 t_1 及 t_3 各保持一定值,