

高等学校教学用书

冶金炉理论基础

东北工学院冶金炉教研室著



中国工业出版社

高等学校教学用书



冶金炉理论基础

东北工学院冶金炉教研室 著

中国工业出版社

冶金炉理論基础

(供冶金工业出版社征订重印)

*

中国工业出版社出版(北京东黄城根路10号)

(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ • 印张 $21 \frac{5}{8}$ • 插页 8 • 字数 470,000

1959年9月北京第一版

1961年7月北京新一版 • 1961年7月北京第一次印刷

印数 0001—813 • 定价: 2.60元

统一书号: 15165 • 206《冶金—78》

310508/15

出版者的話

本書是由东北工学院冶金爐教研室全体 教师，在
党支 部的直接领导下集体編写成的，作为向偉大的建
国十周年的献礼。

本書“冶金爐理論基础”是冶金爐專業一門重要的理
論性專業課，它是深入學習和掌握各种冶金爐热工所必
須具备的理論基础。本書較詳尽地介紹了气体力学和傳
热学的基础知識及其在冶金爐热工中的应用。全書共分
十七章，此外，在書末尚附有附录和“豎爐散料層內的
气体流动”作为附篇供参考。

本書可作为高等冶金院校冶金爐專業学生學習的教
材，此外，亦可供高等及中等冶金專業学校学生，以及
冶金工厂冶金工程技术人員参考。

序 言

我們以無比兴奋的心情編写这本教材，作为向偉大的建國十周年的献礼。

我国冶金爐專業正式成立于 1953 年。但是直到現在，还没有自己編写过适合于該專業所用的教科書。这种狀況显然已經不應該再繼續下去了。

冶金爐理論基础是冶金爐專業的一門重要的理論性專業課。它是深入學習和掌握各种冶金爐热工所必須具备的理論基础。把实际經驗和理論基础結合起来，才能正确地分析影响生产的各种因素，科学地总结生产經驗，进而指导生产实践。

冶金爐理論基础是在气体力学和傳热学的基础上發展起来的一門綜合的学科。但必須指出，它不仅是單純的气体力学和傳热学。問題在于必須把一般的原理与爐子热工过程結合起来，才能成为指导生产的理論。

这是一門新兴的、年輕的学科，它还处在發育成長的时期，有許多理論性問題并没有很好的解决。近些年来，这门学科正在迅速勃蓬的發展着。它在冶金工業中所佔的重要地位，愈来愈显著了。

这本书是我們根据过去几年来給冶金爐專業学生講授“冶金爐理論基础”这門專業課的講稿整理而成的。其中包括了該專業学生所必需掌握的一般气体力学和傳热学的基础知識，以及几种重要类型的冶金爐的系統理論。全書共分十七章。它的份量大致相当于 130~140 小时講授時間。在作为教科書使用时，有的章节不必在課堂上講授。例如第八章“管道和鼓風机工作”本来屬於另外一門課程，但为了讀者便于获得冶金爐系

統氣體力學方面完整的知識，所以把它包括了進來。

傳質過程是爐子熱工方面的一個重要環節，所以列入了“傳質理論”一章（第十七章）。就傳質與傳熱的類似性而言，把它列入本書中也是合適的。

本書之末附有“豎爐散料層內的氣體流動”這一份材料。它雖然是一個極有意義的實際問題，但是由於我們對它的研究剛剛開始，沒有充分實際的基礎，因而附在書後，僅供參考。

燃燒過程沒有列入書中，這是因為它與燃料合併起來組成了另一門課程（燃料及燃燒）。

編寫這本書的重要基礎是向蘇聯學習的收穫。1953~1955年蘇聯專家那扎洛夫教授曾在我院講學，給了我們許多幫助。蘇聯學者發表的許多著作更是編寫本書大部分章節時的重要參考。

書中許多問題是我們結合自己在教學和科學研究工作中的體會編寫的，其中有的屬於新觀點的提出，有的屬於新公式的推導和證明，推演過程的簡化，有的屬於闡述方法的重大修改，所有這些都是我們提出來願與讀者商榷的問題。

本書為了與實際更緊密的結合，把有些章節擴大了（如火焰爐內氣體流動，管道和鼓風機工作），並且新添了一些章節（如流化爐的氣體力學，傳質理論，電阻爐的熱交換，豎爐散料層內的氣體流動）。

在編寫過程中，各章節都經過了集體的討論和研究，尽可能地注意了內容的正確性、文句的嚴密性和問題闡述的方法。

雖然如此，由於我們知識水平有限，實踐基礎不夠，參閱文獻不多，本書的缺點和錯誤在所難免，尤其是按照自己的理解和體會所發揮的各個問題可能更不完善。熱誠地歡迎讀者廣泛地提出批評和意見。

本書是在冶金爐專業黨支部和專業委員會直接領導下，採取個人執筆集體討論的方式編寫成的，各章執筆人如下：

第一章 任世錚

第二章 寧寶林、郭茂先 (§ 4 中散料阻力)

第三章 任世錚、陸鍾武 (§ 3)

第四章 陸鍾武

第五章 陸鍾武、任世錚 (§ 4 中非應用部分)

第六章 郭茂先

第七章 任世錚

第八章 水力学教研室 佟慶理

第九章 任世錚

第十章 任世錚

第十一章 任世錚、陸鍾武 (§ 8)

第十二章 任世錚

第十三章 任世錚

第十四章 朱汝恩

第十五章 陸鍾武

第十六章 寧寶林、任世錚 (§ 4, § 6, § 7, § 10) 陸鍾武 (§ 9)

第十七章 郭茂先

壘爐散料層內的气体流动 陸鍾武、閔斌生

參加本書編委會工作的(审稿, 討論等), 除上述執筆人外, 有池桂馨、李皎、吳恩林、郭伯偉、劉春聲、楊宗山等。

編委會特別感謝北京鋼鐵學院倪學梓同志、化工冶金研究所郭慕孫同志、中南冶學院劉元揚同志、鞍鋼設計院齊家典同志以及本院煉鐵教研室、煉鋼教研室和水力学教研室的同志們, 他們對於本書有些章節提供了寶貴材料或意見。

編委會

目 录

序言

第一章 气体力学的基本定律 1

§ 1. 緒言 1

§ 2. 气体的状态方程式 2

§ 3. 粘度 4

§ 4. 流体平衡方程式 7

§ 5. 阿基米德原理和连通器 11

§ 6. 稳定流时的連續方程式 14

§ 7. 白奴里方程式 15

§ 8. 应用于二流体的流体平衡方程式与白奴里方程式 20

§ 9. 压头的转变和圖解分析 22

参考文献 33

第二章 流动性質及阻力損失 34

§ 1. 气体流动性質 34

§ 2. 摩擦阻力損失 50

§ 3. 局部阻力損失 53

§ 4. 几种特殊的阻力損失 60

参考文献 69

第三章 气体的流出 71

§ 1. 非压缩性气体的流动 71

§ 2. 烟囱 77

§ 3. 压缩性气体的流出 89

参考文献 104

第四章 噴射器 105

§ 1. 噴射的基本原理 105

§ 2. 噴射器及其工作 108

§ 3. 噴射器的計算	117
参考文献	123
第五章 火焰爐內的气体流动	124
§ 1. 火焰爐內气体的自然流动	124
§ 2. 关于流股理論	127
§ 3. 流股作用下的爐內气体流动	139
§ 4. 分流定則及其應用	150
参考文献	158
第六章 流化爐的气体力学	160
§ 1. 前言	160
§ 2. 流化的机理	161
§ 3. 不連續流化床	166
§ 4. 連續流化床	186
§ 5. 气动輸送	188
参考文献	189
第七章 相似原理及因次分析	191
§ 1. 相似的定义和概念	193
§ 2. 相似准数	195
§ 3. 相似定理	201
§ 4. 因次分析	204
§ 5. 模型法	207
参考文献	211
第八章 空气管道的計算与鼓風机的选择	212
§ 1. 空气管道的計算	212
§ 2. 鼓風机的基本类型及其在冶金工業中的应用	223
§ 3. 离心式通風机	224
§ 4. 通風机的特性曲綫	232
§ 5. 通風机在管道上的工作	240
§ 6. 通風机的幷联和串联	243

§ 7. 通風机的調节	247
§ 8. 通風机的選擇及其計算	249
§ 9. 离心式(渦輪)鼓風机的基本类型、工作原理及結構 部件	254
§ 10. 罗茨鼓風机	257
参考文献	261
第九章 傳热学概論及穩定态傳导傳热	262
§ 1. 傳热学概論	262
§ 2. 傅立叶定律	264
§ 3. 傅立叶方程式的解	267
§ 4. 壁內的溫度分佈	275
§ 5. 物体有內热源时的傳导傳热	277
§ 6. 傳导傳热的实验式	278
§ 7. 平均值	280
参考文献	286
第十章 对流傳热	287
§ 1. 牛頓公式	287
§ 2. 边界給热微分方程式	289
§ 3. 傅立叶——克希霍夫导热微分方程式	290
§ 4. 热相似准数	293
§ 5. 准数方程式	296
§ 6. 因次分析应用于对流傳热	297
§ 7. 实验結果的处理	299
§ 8. 自然对流傳热	304
§ 9. 强制对流傳热	308
§ 10. 流体横向流过管和管羣	312
§ 11. 对流傳热的流体动力学原理	316
参考文献	320
第十一章 輻射傳热	321

§ 1. 基本概念	321
§ 2. 辐射的基本定律	324
§ 3. 角度系数	336
§ 4. 两个灰体表面构成封闭体系时的辐射热交换	342
§ 5. 有隔热板时的辐射热交换	348
§ 6. 两个灰体表面构成的封闭体系中的热电偶温度	350
§ 7. 通过门孔的辐射热损失	353
§ 8. 辐射与传导的类似	356
§ 9. 气体的辐射和吸收	360
§ 10. 二氧化碳和水气的辐射	366
§ 11. 辉焰辐射	371
§ 12. 通道中的辐射热交换	373
参考文献	375
第十二章 火焰爐爐膛中的辐射热交换	376
§ 1. 有效辐射和差額热流	377
§ 2. 爐壁温度	378
§ 3. 辐射热流	379
§ 4. 通过火焰爐門孔的辐射热损失	384
§ 5. 火焰爐爐膛中热电偶的温度	385
§ 6. 温度 4 次方的平均值 T^4	389
参考文献	394
第十三章 稳定态綜合傳热	396
§ 1. 綜合傳热	395
§ 2. 通过多层壁的傳热	399
§ 3. 加强給热和絕热	403
§ 4. 换热器的計算	407
参考文献	418
第十四章 电阻爐內的热交换	419
§ 1. 电阻爐內的辐射热交换	421

§ 2. 影响有效辐射表面 F 效的因素的分析	424
§ 3. 电阻爐内的对流傳热	438
参考文献	441

✓ 第十五章 豎爐内的热交换 442

§ 1. 理想料塊 ($\lambda = \infty$) 在逆流情况下的热交换	442
§ 2. 实际料塊在逆流情况下的热交换	449
§ 3. 豎爐内的热交换	451
参考文献	454

第十六章 不定态傳导傳热 455

§ 1. 不定态导热微分方程式及边值条件	455
§ 2. 第一类边界条件: $t_{\text{表}} = \text{常数}$	466
§ 3. 第一类边界条件: $t_{\text{表}} = t_{\text{始}} + cr$	476
§ 4. 第二类边界条件: $q_{\text{表}} = \text{常数}$	488
§ 5. 第三类边界条件: $t_r = \text{常数}$	495
§ 6. 薄材在恒温介質中的加热——斯塔尔克公式	515
§ 7. 恒温介質中加热時間的分段計算法	518
§ 8. 物体的不对称加热	531
§ 9. 不定态导热問題的其他解法	546
§ 10. 蓄热室和热风爐的傳热系数	563
参考文献	571

✓ 第十七章 傳質理論 572

§ 1. 基本概念	572
§ 2. 傳質过程的机理	581
§ 3. 傳質过程的基本方程式	584
§ 4. 逆流傳質	590
§ 5. 对流傳質微分方程式及对流傳質相似	592
§ 6. 固体碳的燃燒	596
✓ § 7. 干燥过程	599
§ 8. 流化床的傳質	604

参考文献.....	607
附篇：竖爐散料層內的气体流动.....	608
§ 1. 气体通过散料时的阻力损失以及散料的透气性.....	611
§ 2. 透气性均一的散料层.....	613
§ 3. 透气性不均一的散料层.....	620
§ 4. 气流对于散料的“支撑力”.....	628
§ 5. 散料中的送風空洞和放射形气流.....	630
参考文献.....	636
附录.....	637

第一章 气体力学的基本定律

§ 1. 緒 言

絕大部分的冶金爐都是以气体燃料、液体燃料和固体燃料为热能的来源。气态的燃燒生成物是帶热体，在其流动过程中把热能傳給被加热物。均匀地和有效地加热是与气体的流动相連的，廢气出爐后如何經過烟道、廢热回收設備并自烟囱排出，空气和气体或液体燃料的輸入爐內，以及爐体的漏气等等都是爐子工作者經常碰到的問題。这些問題能否得到妥善的解决，影响到爐子生产的成本、質和量。

气体力学的研究对于爐子操作、爐子設計以及安全技术等方面都有重要意义。

冶金爐气体力学的大步發展乃是近五十年間的事。它的特点是高溫，并且在气体流动过程中伴随着化学变化和热交換，在某些情况下溫度和重度的变化也很大。可是，也有这样的流动——化学变化不太激烈，压力、溫度和重度的变化都不大，这时，發展得比較完善的水力学中的若干基本定律便可以在一定程度上应用到冶金爐上。这样，就給冶金爐气体力学的研究取得了一些方便。因此水力学被視為本書的基本課程。但是为了自成体系，必要的重复是不可避免的。由于清楚的概念对于辨識爐子系統中气体的流动很重要，所以本書在某些問題的討論上又显得是粗淺和細致的。应当認為，有許多問題还没有得到最后的解决，但的确是爐子工作者常常碰到的問題。本書

对这些問題作了些定性的解釋，介紹給讀者，以期获得迅速的發展。

§ 2. 气体的状态方程式

与液体相較，气体能够充滿容器，沒有一定的表面，此外当压力比較低而溫度比較高时，气体基本上都具有下列通性：

当一定气体的溫度一定时，体积 V 与压力 P 成反比

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1} \quad (1-1)$$

当一定气体的压力一定时，体积 V 与絕對溫度 T 成正比

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-2)$$

当一定气体的体积一定时，压力 P 与絕對溫度 T 成正比

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-3)$$

如果令 V_0 和 T_0 为标准状态 (0°C , 760 毫米汞柱) 下气体的体积和絕對溫度， V_1 是一定气体在同一压力下溫度为 T_1 时的体积，則由式 1-2 得：

$$V_1 = V_0 \frac{T_1}{T_0} = V_0 \frac{273 + t_1}{273} = V_0 \left(1 + \frac{t_1}{273} \right) = V_0 (1 + \beta t_1) \quad (1-4)$$

式中 $\beta = \frac{1}{273}$ ， β 叫做气体的体积膨脹系数， $1/^\circ\text{C}$ ，

t_1 ——对应于 T_1 的攝氏溫度， $^\circ\text{C}$ 。

如果式 1-4 中的 V_0 和 V_1 代表單位時間內流过某一定截面的气体的体积 (米³/秒)，則以截面积除兩边，便得到对应于 V_0 和 V_1 的流速 W_0 和 W_1 (米/秒)；

$$W_1 = W_0(1 + \beta t_1). \quad (1-5)$$

式 1-4 中的 V 也可以代表 1 公斤气体的体积, 于是,

$$\gamma_1 = \frac{1}{V_1}, \quad \gamma_0 = \frac{1}{V_0}.$$

式中 γ_1, γ_0 —— T_1 和 T_0 时的重度, 公斤/米³;

$$\text{則} \quad \gamma_1 = \frac{1}{V_1} = \frac{1}{V_0(1 + \beta t_1)} = \gamma_0 \frac{1}{1 + \beta t_1}. \quad (1-6)$$

气体方程式綜合了式 1-1、1-2 和 1-3, 即,

$$\frac{PV}{T} = \text{常数}.$$

$$\text{或} \quad PV = RT. \quad (1-7)$$

在工程計算上 V 为單位重量气体的体积, 米³/公斤; P 的單位为公斤/米²; T 为絕對溫度, °K. 于是气体常数 R 的單位为米/°K; 由于 V 随气体种类而異, 故对于不同的气体 R 的数值也不同。例如空气为 29.27; 氧为 26.52; 氮为 420.9; 二氧化碳为 19.28; 水蒸气为 47.1。

[例 1]. 試求氧的气体常数 R 。

解: 在 1 物理大气压 (10332 公斤/米²) 下, 每公斤氧的体积

$$V = \frac{22.412}{32} \text{ 米}^3/\text{公斤},$$

$$\text{故} \quad R = \frac{PV}{T} = \frac{10332 \times \frac{22.412}{32}}{273} = 26.52 \text{ 米}^3/\text{°K}.$$

由式 1-7 不难得出一定气体的重度与溫度和压力之間的关系。

$$\gamma_2 = \gamma_1 \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2}. \quad (1-8)$$

式 1-1 到式 1-8 只适用于理想气体, 也就是說对实际气体而言, 这些公式是近似的。在高溫和常压下, 这些公式具有很

4
好的适用性。

§ 3. 粘 度

流体，包括气体和液体，受到任意大小的剪力作用时会發生連續不断的变形。彈性体、可塑体和固体（如流沙）則沒有这种特性。剪力是平切于表面的分力，如以此表面的面积除之，便得到該表面上的平均剪应力。

在均一相的平行流中，当一層流体对另一層相鄰的流体作相对移动时，由于分子的热运动，一部分流体分子由較快的一層进入了較慢的一層；也有一部分流体分子由較慢的一層进入了較快的一層，这样就在兩層流体之間产生了动量的交换。于是較快的一層显示出一种力帶动較慢的一層向前移动；較慢的一層則显示出大小相等方向相反的力阻止較快的一層前进。同时，分子之間的內聚力对兩相鄰流層也同样起着帶动流动或阻止流动的相互作用。

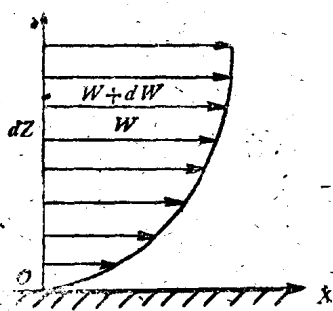


圖 1-1 速度梯度圖

这种体現在流体流动时使兩相鄰流層的流速趋向均一的大小相等而方向相反的剪力称之为流体的粘性力或內摩擦力，按照牛頓的粘性律，这粘性力正比于相鄰兩層流体之間的接触面 A 以及垂直于粘性力方向的速度梯度 $\frac{dW}{dz}$ (圖 1-1)，写成等式便是

$$F = \mu \frac{dW}{dz} A, \quad (1-9)$$

式中 F ——粘性力，公斤；