

有色金属总论

有色金属提取冶金

铜镍钴

锌镉铅铋

手册

锡锑汞

铝

镁

锂铍

钨钼铋

钛锆铪

钒铌钽

稀土金属

贵金属

现代化设备

能源与节能

A HANDBOOK
FOR EXTRACTIVE METALLURGY
OF NONFERROUS METALS

能源与节能

冶金工业出版社

TF 8-62

T 24

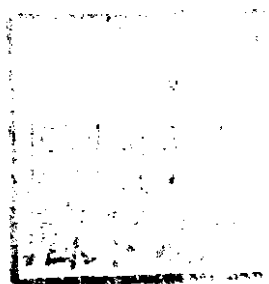
有色金属 提取冶金手册

能源与节能

《有色金属提取冶金手册》编辑委员会 编

本卷主编 唐帛铭

GT05/23



冶金工业出版社

122067

(京)新登字036号

内 容 简 介

《有色金属提取冶金手册》是为有色冶金工作者编写的一套较全面的工具书和参考书。这套手册分14卷：第1卷有色金属及其资源，第2卷铜镍钴，第3卷锌镉铅铋，第4卷锡铋汞，第5卷铝，第6卷镁，第7卷锂铍，第8卷钨钼铌，第9卷钛锆钪，第10卷钒钽铌，第11卷稀土金属，第12卷贵金属，第13卷现代化设备，第14卷能源与节能。

本卷为能源与节能卷。本着理论与实际并重，国内和国外、目前与长远相结合的原则，汇集了国内外近年来发表的大量文献，详细阐述了有色金属提取冶金中的能源与节能方面的新概念、新理论和全面节能的途径。主要内容包括：能源及有色金属提取冶金能源，节能的基本原理，节能的途径及经济效益分析，有色冶金企业和设备的能量平衡，燃料燃烧设备及合理组织燃烧过程，余热利用的方案、设备和经济效益分析，铜、镍、锌、铅、锡、铝、镁、钛等八种主要有色金属提取冶金过程能源消耗的国内外对比分析，各自节约能源的方法与途径等。此书对从事有色冶金生产、管理、科研和设计的技术人员，大专院校的教师和高年级学生都有较大的参考价值。

有色金属提取冶金手册

能源与节能

《有色金属提取冶金手册》编辑委员会 编

本卷主编 唐帛铭

责任编辑 刁传仁

•

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷33号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

•

850×1168 1/32 印张 14 字数 365 千字

1992年3月第一版 1992年3月第一次印刷

印数 00,001~3,000 册

ISBN 7-5024-0888-6

TF·210 定价13.20元

《有色金属提取冶金手册》

编辑委员会

主 任 赵天从

副主任 傅崇说 何福煦 梅 炽 郑蒂基

委 员 (依姓氏笔划为序)

龙远志 卢宜源 任鸿九 陈文修

汪锡孝 汪 键 李洪桂 何福煦

杨重愚 杨济民 林振汉 夏忠让

郑蒂基 钟海云 赵天从 赵秦生

唐帛铭 莫似浩 徐日瑶 宾万达

梅 炽 傅崇说 彭容秋 潘叶金

秘 书 任鸿九(兼) 卢宜源(兼) 江绍策

总 序 言

《有色金属提取冶金手册》是为有色金属工作者编写的一套较全面的工具书和参考书。凡从事有色金属提取冶金方面的生产、科研、设计、情报等科技人员都可从中找到简明扼要的现代资料。这套手册也可作为有色冶金专业教师、研究生及高年级学生的辅助教材，并可供需要了解有色冶金历史、现状及今后发展动向的企业经营管理人员参考。在不大的篇幅内系统介绍各种主要有色金属的生产是本手册的特点。

这套手册着重介绍了10种重金属、4种轻金属、9种高熔点稀有金属、全部稀土金属及金银铂钯等贵金属的发展史略、与提取冶金有关的物理化学、工业矿物原料、冶炼和精炼方法、工艺技术参数、现代化生产设备、有色金属提取冶金的能源与节能等，内容叙述详略适当，数据翔实可靠。

这套手册分为14卷陆续出版。

参加这套手册的编写人员主要为中南工业大学有色冶金系的教授和副教授。各卷的书名及其主编人如下：

1. 有色金属总论 赵天从 何福煦 2. 铜镍钴 夏忠让
3. 锌镉铅铋 彭容秋 4. 锡锑汞 赵天从 汪健
5. 铝 杨重愚 龙远志 杨济民 6. 镁 徐日瑤
7. 锂铍 汪锡孝 8. 钨钼铌 李洪桂
9. 钛锆铪 莫似浩 林振汉 10. 钒铌钽 赵秦生 钟海云
11. 稀土金属 潘叶金 12. 贵金属 卢宜源 宾万达
13. 现代化设备 陈文修 梅炽 14. 能源与节能 唐帛铭

在收集素材的过程中，得到了校内外不少同志的大力支持，特此致谢。

《有色金属提取冶金手册》编辑委员会

1990年10月

本 卷 序 言

有色冶金工业是国民经济中耗能大的部门之一，在很大程度上，能源制约着它的发展进程，因此，必须合理和有效地利用能源。每个有色冶金工作者都应该了解和分析国内外本领域的耗能现状、存在问题及节能途径，从而为发展我国有色冶金工业作出应有的贡献。本书即是在这一思想指导下进行编撰的一次尝试。

本书力图反映国内外有色金属提取冶金中的能源和节能方面的新概念、新理论以及节能的有效途径和成果，在编写取材时，按照理论与实际相结合、国内与国外相结合、目前与长远相结合的原则，尽可能多地汇集国内外的有关资料。根据各章节的特点，或着重于列出数据和图表，或着重于文字叙述，并辅以必要的图表说明，或着重于理论分析与计算，各章之间既有连贯性，又有相对的独立性。

由于有色金属矿石的品位较低而伴生金属多，同时又要考虑综合利用资源和保护环境的要求，故节能问题涉及的内容既广泛又复杂，加之目前国内外对有色金属提取冶金节能问题尚未进行全面系统的研究，资料有限，不同作者对同一问题观点各异，所得结论也往往大相径庭，莫衷一是，因此给本书的编撰带来了不少困难。虽然作者在选材时，进行了尽可能全面地对比研究，力求准确可靠，但限于水平和条件，缺点和错误在所难免。欢迎读者批评指正，并在引用书中的资料和数据时，应根据具体情况，进行分析对比，以免失误。

本书由中南工业大学唐帛铭、刘非轼编写，傅志华提供了部分素材，全书由唐帛铭主编。赵天从教授进行了全书的审阅，傅崇说和何福煦两教授提出过有益的建议。

唐帛铭

1990年8月

目 录

第一章 能源及有色金属提取冶金能源	1
第一节 能源	1
一、能源的定义和分类	1
二、能量单位的换算	1
第二节 世界常规能源资源及其生产和消费构成	9
一、世界常规一次能源资源	9
二、世界能源生产量和消费量及其构成	10
三、主要工业国能源生产量和消费量及其构成	10
四、我国能源生产量和消费量及其构成	10
第三节 有色金属提取冶金能源	25
一、煤	25
二、重油	40
三、天然气	41
四、电力	41
主要参考文献	49
第二章 节能的基本原理	51
第一节 节能的基本概念	51
一、节能概念	51
二、节能分析的基本原则	51
三、节能分析的技术指标	51
四、载能体与完全能耗	51
第二节 节能的理论基础	59
一、能的品质(品位)	59
二、焓的概念及其计算	60
三、焓分析及计算实例	69
主要参考文献	88
第三章 节能的基本途径及经济效果分析	91
第一节 节能的基本途径	91
第二节 节能技术的经济分析	99

一、节能技术的经济意义	99
二、节能技术经济评价的方法	100
三、节能技术经济效果分析中的若干原则	103
四、节能技术经济效果分析实例	105
主要参考文献	112
第四章 有色冶金企业和设备的能量平衡	114
第一节 企业能量平衡的基本概念	114
一、企业能量平衡的涵义	114
二、企业能量平衡的目的	114
三、能量平衡表和能流图	115
第二节 有色冶金企业的能量平衡	118
一、企业能量平衡的方法	118
二、企业能量平衡的一般步骤	118
三、进行能量平衡应注意的问题	120
四、企业能量平衡的验收	120
五、企业能量平衡实例	120
第三节 设备(装置)的能量平衡	124
一、编制设备(装置)能量平衡的目的与方法	124
二、有色冶金炉窑的能量平衡	125
三、有色冶金炉窑能量平衡实例	134
四、铜、铅、锌电解槽的能量平衡	145
五、铝、镁电解槽的能量平衡	147
主要参考文献	155
第五章 合理组织燃烧	157
第一节 常用燃料的燃烧方法与设备	157
一、气体燃料燃烧	157
二、液体燃料燃烧	157
三、气体、液体燃料燃烧装置	158
四、粉煤(喷射)燃烧	164
五、块(碎)煤炉栅燃烧	169
六、燃烧室热负荷	173
第二节 优化燃烧	175

一、热风(热煤气)、富氧燃烧	175
二、低空气比燃烧	177
三、油、水混合(乳化)燃烧	184
四、重油磁化燃烧	185
五、低排烟温度燃烧	188
六、最佳炉膛压力燃烧	189
七、抑制 NO_x 的燃烧	190
主要参考文献	197
第六章 余热利用	199
第一节 概述	199
一、余热利用的基本原则	199
二、我国余热资源概况	200
三、工业炉排烟的余热回收率	200
第二节 余热回收最佳参数及经济效益的确定	201
一、余热回收最佳参数的确定	201
二、余热回收经济效益的确定	210
第三节 余热回收方式与装置	210
一、余热回收方式	210
二、余热回收装置	210
主要参考文献	239
第七章 主要有色金属提取冶金过程的能源消耗与节约	241
第一节 概述	241
第二节 铜、镍、锌、铅、锡提取冶金过程能源消耗与 节约	243
一、铜提取冶金过程的能耗分析与节能途径	243
二、镍提取冶金过程的能耗分析与节能途径	271
三、锌提取冶金过程的能耗分析与节能途径	281
四、铅提取冶金过程的能耗分析与节能途径	298
五、锡提取冶金过程的能耗分析与节能途径	310
第三节 铝、镁、钛提取冶金过程的能源消耗与节约	322

一、铝提取冶金过程的能耗分析与节能途径	322
二、镁提取冶金过程的能耗分析与节能途径	350
三、钛提取冶金过程的能耗分析与节能途径	367
主要参考文献	383

附 录	391
-----------	-----

表 1 几种能量的焓、熵和转换比	391
表 2 热能能级表 (环境温度 $T_0 = 298.15\text{K}$)	393
表 3 部分均质物的贬值焓和标准比焓 ($t_0 = 291.15\text{K}$, $p_a = 101325\text{Pa}$)	394
表 4 一些节能措施的经济效果	397
表 5 某些有色冶金炉出炉烟气温度及其它数据	400
表 6 GPH-N与GPH-W 系列高温喷流换热器的基本 参数	401
表 7 有色金属电解的电流效率和槽电压指标	401
表 8 各种火法炼铜过程工序能耗的比较	402
表 9 从铜精矿到电铜单位综合能耗等级标准	403
表 10 日本 10 大铜厂粗铜能耗	404
表 11 日本铜阳极炉燃料消耗 (不包括电耗)	405
表 12 日本铜电解厂主要技术经济指标	406
表 13 苏联熔池熔炼法与其它炼铜法的技经指标对比	408
表 14 日本各炼铜厂实行电解槽主要能耗	408
表 15 国外电炉熔炼-电解法生产镍的能耗	410
表 16 从镍精矿到电镍单位综合能耗等级标准	410
表 17 苏联用三种方法处理 1t 干氧化镍矿的能耗对比	411
表 18 日本主要锌、铅冶炼厂基本情况及主要节能措施	412
表 19 焙烧-浸出-电积锌 (特级) 能耗	416
表 20 国外专家对不同方法的湿法炼锌厂电锌的单位能 耗调查数据 (吨锌锭)	417
表 21 国外密闭鼓风炉法生产特级锌的能耗	418
表 22 国外四种炼锌方法综合能耗水平	418

表23	锡冶炼各工序综合能耗	419
表24	苏联电炉炼锡半连续法与间断熔炼法指标对比	420
表25	国外各种炼铅法吨粗铅的能耗水平	421
表26	国外粗铅电解与火法精炼的能耗水平	421
表27	主要产镁国电解生产工艺的技术经济指标	423
表28	不同容量铝电解槽的生产和基建经济指标	424
表29	日本生产1t铝锭的电耗及油耗变化情况	425
表30	我国主要有色冶金工厂能源消耗量及其构成	426
表31	我国主要有色冶金工厂基本情况与主要节能 措施	428
表32	我国5t/炉联合法生产海绵钛与国内外技术经济 指标对比	433

第一章 能源及有色金属

提取冶金能源

第一节 能 源

一、能源的定义和分类

(一) 能源定义

能够提供某种形式的能量（热能、光能、电能、机械能等）的自然资源叫能源；或者说，凡能量比较集中的“含能体”（如煤）或“能量过程”（如流水）叫能源。

(二) 能源分类

能源的分类如表1-1所示。

二、能量单位的换算

(一) 各种能量单位的换算

各种能量单位的换算见表1-2。

(二) 标准燃料及与其它能量单位的换算

1. 标准燃料

在计算能源消耗量时，可用1kg标准煤或1t标准煤表示。

凡低位发热量等于29270kJ(7000kcal)的固体燃料，称为1kg标准燃料（1kg煤当量）。

凡低位发热量等于41820kJ（10000kcal）的液体或气体燃料，称1kg标准油（油当量）或1m³●标准气。

1kg标准煤=0.7kg标准油=0.7m³标准气。

1kg标准油=1m³●标准气=1.429kg标准煤。

① 指在标准状态下。下同。

表 1-1 能源分类表^(1,2)

按形成条件分	按成因分	第一类能源 (来自地球以外)		第二类能源 (来自地球内部)	第三类能源 (来自地球和其它天体的作用)
		常规能源	新 能 源		
一次能源 (自然界中现成的)	再生能源 (可补充能源)	水 能	太阳能 风能 海洋动力能 海洋波力能 海水温差	生物质能 雷电能 宇宙射线能	地热能 火山能 地震能 潮汐能
	非再生能源 (不可补充能源)	泥 煤 油 砂 褐 煤 原 油 烟 煤 天然气 无烟煤 煤成气 石 煤 油页岩		原子能	
二次能源 (由一次能源加工转换而成)		电力、煤气、焦炭、型煤、氢、酒精、焦油、煤油、 重油、石油液化气、沼气、蒸汽、生产过程的余能			

1t煤当量● (TCE, Tonnes of Coal Equivalent)=29.27 × 10⁶kJ=7 × 10⁶kcal。

1t油当量● (TOE, Tonnes of Oil Equivalent)=41.82 × 10⁶kJ=10 × 10⁶kcal。

国外还采用百万吨 (Mt) 油当量和百万吨煤当量作为能源计量单位，它们与其它单位的换算关系如表1-3所示。

● 在以下各章中,百万吨标煤、吨标煤及千克标煤分别用Mtce、toe及kgce表示。

● 百万吨油当量、吨油当量、千克油当量及桶油当量、千桶油当量分别用Mtce、toe、kgce、boe、kboe表示。

表 1-2 能量单位换算表 (3.4)

能量单位	J	kW·h	kcal _{IT} ①	kcal ₂₀ ②	Btu	Therm③	Quad④
J	1	2.7778×10^{-7}	2.3885×10^{-4}	2.3914×10^{-4}	9.4781×10^{-4}	9.4781×10^{-9}	9.4781×10^{-22}
kW·h	3.6×10^6	1	8.5985×10^2	8.6091×10^2	3.4121×10^3	0.03412	0.03412×10^{-13}
kcal _{IT}	4.1868×10^3	1.163×10^{-3}	1	1.0012	3.9683	3.9683×10^{-5}	3.9683×10^{-18}
kcal ₂₀	4.1816×10^3	1.1616×10^{-3}	0.9988	1	3.9634	3.9634×10^{-5}	3.9634×10^{-18}
Btu	1055.06	2.9307×10^{-4}	2.52×10^{-1}	2.5231×10^{-1}	1	10^{-5}	10^{-18}
Therm	1055×10^9	29.3	0.252×10^5	0.2523×10^5	10^5	1	10^{-13}
Quad	1055×10^{18}	29.3×10^{13}	0.252×10^{18}	0.2523×10^{18}	10^{18}	10^{13}	1

①kcal_{IT}(国际蒸汽表千卡)是在1956年伦敦第五届国际蒸汽大会上规定的。
②kcal₂₀(20℃千卡)是在标准大气压下, 1g纯水温度从19.5℃升高到20.5℃所需的热量。
③Therm(舍姆)系英国计量能量的单位, 它常用在天然气贸易中。1Therm约等于100英尺³天然气所含的能量。
④Quad(夸特)系英国计量能量的常用单位。

表 1-3 能源当量间的换算^[5,22]

能源当量	Mtce/d	boe ^① /d	kboe/d	Mtoe/a
Mtce/a	1	13121.3	13.121	0.646
boe/d	76.211×10^{-6}	1	10^{-3}	49.23×10^{-6}
kboe/d	76.211×10^{-3}	10^3	1	49.23×10^{-3}
Mtoe/a	1.54798	20311.8	20.3118	1
Mft ³ 天然气/d	13.14×10^{-3}	172.414	0.1724	8.4884×10^{-3}
Gm ³ 天然气/a	1.3428	17620	17.62	0.8675
GW·h/a	0.12284×10^{-3}	1.6118	1.6118×10^{-3}	79.3521×10^{-6}
TJ/a	34.1208×10^{-6}	0.4477	0.4477×10^{-3}	22.042×10^{-6}
TWa/a	10^3	13.121×10^6	13.121×10^3	646

能源当量	Mft ³ 天然气/d	Gm ³ 天然气/a	GW·h/a	TJ/a	TWa/a
Mtce/a	76.1048	0.7447	8141	29307.6	10^{-3}
boe/d	5.8×10^{-3}	56.75×10^{-6}	0.6204	2.2336	0.762×10^{-7}
kboe/d	5.8	0.0568	620.432	2233.6	0.762×10^{-4}
Mtce/a	117.808	1.1528	12602.1	45367.6	0.01548
Mft ³ 天然气/d	1	0.0098	106.971	385.096	1.314×10^{-5}
Gm ³ 天然气/a	102.2	1	10932	39356	1.3387×10^{-3}
GW·h/a	9.3483×10^{-3}	0.9148×10^{-4}	1	3.6	0.1228×10^{-6}
TJ/a	2.5968×10^{-6}	0.2541×10^{-4}	0.2778	1	0.3412×10^{-7}
TWa/a	76.105×10^3	0.7447×10^3	8141×10^3	29307.6×10^3	1

①1桶原油 $\approx 0.136t$, 或1桶原油 $\approx 0.159m^3$;②1Gm³ $= 10^9m^3$;

③电站生产的电之当量热值, 根据电站的热效率, 一般应乘以35%;

1GW $= 10^9W$;④1TJ $= 10^{12}J$;⑤TWa/a(太瓦年/年)是常用的表示能源供应、转换、运输和使用速率的单位, 1TW $= 10^{12}W$;

2. 一次能源的发热量, 能量的当量值 (当量热值) 和能源的等价值 (等价热值)

当量值与等价值是两个不同的概念。能量的当量值是指不同种类能量相互转化时, 由于采用的单位不同而表现出的数量关系; 能源的等价值是指将一次能源加工转换成二次能源时, 能源原料与能源产品之间的数量关系。

表1-4为一次能源的平均低位发热量; 表1-5为二次能源的平均当量值和等价值; 表1-6为耗能工质的平均能源等价值。

表 1-4 一次能源的平均低位发热量^{〔5.6〕}

名 称	单位	平均低位发热量			备 注
		kJ	kcal	kgce	
无烟煤	kg	26350	6300	0.9	①应首先采用实测数据, 其次可采用生产单位给定数据。如以上有困难时, 方可采用本表之平均数据 ②燃料的低位发热量即当量值又是等价值, 二者是一致的
烟 煤	kg	26350	6300	0.9	
炼焦煤	kg	26350	6300	0.9	
贫煤 (动力用煤)	kg	20910	5000	0.714	
褐 煤	kg	10455	2500	0.357	
泥 炭	kg	8360	2000	0.286	
石 煤	kg	6270	1500	0.214	
煤矸石	kg	8360	2000	0.286	
油页岩	kg	6270	1500	0.214	
原 油	kg	41820	10000	1.429	
天然气	m ³	38930	9310	1.33	
煤成气	m ³	33460	8000	1.14	
薪 柴	kg	18400	4400	0.63	

表 1-5 二次能源的平均当量值和等价值 (6~9, 12)

名 称	单 位	能量当量值				能源等价值				备 注
		热 值		kgce	热 值		kgce			
		kJ	kcal		kJ	kcal				
电	kW·h	3597	860	0.123	12546	3000	0.429	1978年		
					12090	2891	0.413	1980年		
					11915	2849	0.407	1982年		
					11710	2800	0.400	1983年		
					11650	2786	0.398	1984年		
					12588	3010	0.430	1986年		
					12354	2954	0.422	1987年		
液体燃料	汽 油	kg	43075	10300	1.471	47260 44790	11300 10710	1.619 1.530	1978年 1982年	
	柴 油	kg	46000	11000	1.571	50600 47840	12100 11440	1.729 1.634	1978年 1982年	
	重 油	kg	41820	10000	1.429	41820	10000	1.429		
	渣 油	kg	37640	9000	1.286	37640	9000	1.286		
	焦 油	kg	36380	8700	1.243	36380	8700	1.243		
	燃 料 油	kg	41280 41340	9870 9885	1.410 1.412				1978年 1982年	
	煤 油	kg	43075	10300	1.471	47380 44790	11330 10710	1.619 1.530	1978年 1982年	