

“十一五”国家重点图书出版规划项目

Zn Pb
h

中国有色金属丛书

中国有色金属工业协会组织编写

铅锌及其共伴生
元素和化合物
物理化学性质手册

赵中伟 任鸿九 主编

Nonferrous Metals



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



“十一五”国家重点图书出版规划项目



中国有色金属丛书

铅锌及其共伴生元素和 化合物物理化学性质手册

中国有色金属工业协会组织编写

赵中伟 任鸿九 主编

藏书



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

内容提要

本数据手册是为提取冶金工作者选编的。全书共 10 部分,分别收集了包括全部重有色金属、贵金属、稀散金属以及铁、锰、铝、钙、镁、硅、砷,及与能源有关的碳、氢、氧等元素和无机化合物的性质数据。书中前 7 部分属化学冶金基础,包括有关物理化学性质、热力学数据、水溶液中的热力学数据、氧化还原电势数据、元素的氧化态与氧化还原电势的关系以及电位 - pH 图;第 8 部分为物理冶金基础——状态图。最后两部分则为与新能源有关的超导和半导体的特性数据,和太阳能电池材料的光学性能。

全书内容丰富,取材有一定的新颖性和实用性。本书可作为大、中、职业院校冶金工程专业与环境工程专业师生的工具书,也可供相关专业的科技人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

铅锌及其共伴生元素和化合物物理化学性质手册/赵中伟,任鸿九
主编. —长沙:中南大学出版社,2011. 12

ISBN 978-7-5487-443-0

I. 铅... II. ①赵... ②任... III. ①铅—物理化学性质—手册
②锌—物理化学性质—手册 IV. TG146.1-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 252977 号

铅锌及其共伴生元素和化合物物理化学性质手册

赵中伟 任鸿九 主编

-
- ☐ 责任编辑 史海燕
☐ 责任印制 文桂武
☐ 出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-88876770 传真:0731-88710482
☐ 印 装 长沙市宏发印刷有限公司
-

- ☐ 开 本 787 × 1092 1/16 ☐ 印张 22 ☐ 字数 546 千字
☐ 版 次 2012 年 11 月第 1 版 ☐ 2012 年 11 月第 1 次印刷
☐ 书 号 ISBN 978-7-5487-0443-0
☐ 定 价 88.00 元
-

图书出现印装问题,请与经销商调换

中国有色金属丛书
NMS 编委会

主任：

康 义

中国有色金属工业协会

常务副主任：

黄伯云

中南大学

副主任：

熊维平

中国铝业公司

罗 涛

中国有色矿业集团有限公司

李福利

中国五矿集团公司

李贻煌

江西铜业集团公司

杨志强

金川集团有限公司

韦江宏

铜陵有色金属集团控股有限公司

何仁春

湖南有色金属控股集团有限公司

董 英

云南冶金集团总公司

孙永贵

西部矿业股份有限公司

余德辉

中国电力投资集团公司

屠海令

北京有色金属研究总院

张水鉴

中金岭南有色金属股份有限公司

张学信

信发集团有限公司

宋作文

南山集团有限公司

雷 毅

云南锡业集团有限公司

黄晓平

陕西有色金属控股集团有限公司

王京彬

有色金属矿产地质调查中心

尚福山

中国有色金属工业协会

文献军

中国有色金属工业协会

委员(以姓氏笔划排序)：

马世光

中国有色金属工业协会加工工业分会

马宝平

中国有色金属工业协会铝业分会

王再云

中铝山东分公司

王吉位

中国有色金属工业协会再生金属分会

王华俊

中国有色金属工业协会

王向东

中国有色金属工业协会钛锆铪分会

王树琪

中条山有色金属集团有限公司

王海东	中南大学出版社
乐维宁	中铝国际沈阳铝镁设计研究院
许 健	中冶葫芦岛有色金属集团有限公司
刘同高	厦门钨业集团有限公司
刘良先	中国钨业协会
刘柏禄	赣州有色冶金研究所
刘继军	荏平华信铝业有限公司
李 宁	兰州铝业股份有限公司
李凤轶	西南铝业(集团)有限责任公司
李阳通	柳州华锡集团有限责任公司
李沛兴	白银有色金属股份有限公司
李旺兴	中铝郑州研究院
杨 超	云南铜业(集团)有限公司
杨文浩	甘肃稀土集团有限责任公司
杨安国	河南豫光金铅集团有限责任公司
杨龄益	锡矿山闪星锑业有限责任公司
吴跃武	洛阳有色金属加工设计研究院
吴锈铭	中国有色金属工业协会镁业分会
邱冠周	中南大学
冷正旭	中铝山西分公司
汪汉臣	宝钛集团有限公司
宋玉芳	江西钨业集团有限公司
张 麟	大冶有色金属有限公司
张创奇	宁夏东方有色金属集团有限公司
张洪国	中国有色金属工业协会
张洪恩	河南中孚实业股份有限公司
张培良	山东丛林集团有限公司
陆志方	中国有色工程有限公司
陈成秀	厦门厦顺铝箔有限公司
武建强	中铝广西分公司
周 江	东北轻合金有限责任公司
赵 波	中国有色金属工业协会
赵翠青	中国有色金属工业协会
胡长平	中国有色金属工业协会
钟卫佳	中铝洛阳铜业有限公司
钟晓云	江西稀有稀土金属钨业集团公司
段玉贤	洛阳栾川钼业集团有限责任公司
胥 力	遵义钛厂
黄 河	中电投宁夏青铜峡能源铝业集团有限公司
黄粮成	中铝国际贵阳铝镁设计研究院
蒋开喜	北京矿冶研究总院
傅少武	株洲冶炼集团有限责任公司
瞿向东	中铝广西分公司

中国有色金属丛书

NMS 学术委员会

主任:

王淀佐 院士 北京有色金属研究总院

常务副主任:

黄伯云 院士 中南大学

副主任(按姓氏笔划排序):

于润沧	院士	中国有色工程有限公司
古德生	院士	中南大学
左铁镛	院士	北京工业大学
刘业翔	院士	中南大学
孙传尧	院士	北京矿冶研究院
李东英	院士	北京有色金属研究总院
邱定蕃	院士	北京矿冶研究院
何季麟	院士	宁夏东方有色金属集团有限公司
何继善	院士	中南大学
汪旭光	院士	北京矿冶研究院
张文海	院士	南昌有色冶金设计研究院
张国成	院士	北京有色金属研究总院
陈景	院士	昆明贵金属研究所
金展鹏	院士	中南大学
周廉	院士	西北有色金属研究院
钟掘	院士	中南大学
黄培云	院士	中南大学
曾苏民	院士	西南铝加工厂
戴永年	院士	昆明理工大学

委员(按姓氏笔划排序):

卜长海	厦门厦顺铝箔有限公司
于家华	遵义钛厂
马保平	金堆城钼业集团有限公司
王辉	株洲冶炼集团有限责任公司
王斌	洛阳栾川钼业集团有限责任公司

王林生	赣州有色冶金研究所
尹晓辉	西南铝业(集团)有限责任公司
邓吉牛	西部矿业股份有限公司
吕新宇	东北轻合金有限责任公司
任必军	伊川电力集团
刘江浩	江西铜业集团公司
刘劲波	洛阳有色金属加工设计研究院
刘昌俊	中铝山东分公司
刘侦德	中金岭南有色金属股份有限公司
刘保伟	中铝广西分公司
刘海石	山东南山集团有限公司
刘祥民	中铝股份有限公司
许新强	中条山有色金属集团有限公司
苏家宏	柳州华锡集团有限责任公司
李宏磊	中铝洛阳铜业有限公司
李尚勇	金川集团有限公司
李金鹏	中铝国际沈阳铝镁设计研究院
李桂生	江西稀有稀土金属钨业集团公司
吴连成	青铜峡铝业集团有限公司
沈南山	云南铜业(集团)公司
张一宪	湖南有色金属控股集团有限公司
张占明	中铝山西分公司
张晓国	河南豫光金铅集团有限责任公司
邵武	铜陵有色金属(集团)公司
苗广礼	甘肃稀土集团有限责任公司
周基校	江西钨业集团有限公司
郑莆	中铝国际贵阳铝镁设计研究院
赵庆云	中铝郑州研究院
战凯	北京矿冶研究总院
钟景明	宁夏东方有色金属集团有限公司
俞德庆	云南冶金集团总公司
钱文连	厦门钨业集团有限公司
高顺	宝钛集团有限公司
高文翔	云南锡业集团有限责任公司
郭天立	中冶葫芦岛有色金属集团有限公司
梁学民	河南中孚实业股份有限公司
廖明	白银有色金属股份有限公司
翟保金	大冶有色金属有限公司
熊柏青	北京有色金属研究总院
颜学柏	陕西有色金属控股集团有限责任公司
戴云俊	锡矿山闪星锑业有限责任公司
黎云	中铝贵州分公司

总序



有色金属是重要的基础原材料，广泛应用于电力、交通、建筑、机械、电子信息、航空航天和国防军工等领域，在保障国民经济建设和社会发展等方面发挥了不可或缺的作用。

改革开放以来，特别是新世纪以来，我国有色金属工业持续快速发展，已成为世界最大的有色金属生产国和消费国，产业整体实力显著增强，在国际同行业中的影响力日益提高。主要表现在：总产量和消费量持续快速增长，2008年，十种有色金属总产量2 520万吨，连续七年居世界第一，其中铜产量和消费量分别占世界的20%和24%；电解铝、铅、锌产量和消费量均占世界总量的30%以上。经济效益大幅提高，2008年，规模以上企业实现销售收入预计2.1万亿以上，实现利润预计800亿元以上。产业结构优化升级步伐加快，2005年已全部淘汰了落后的自焙铝电解槽；目前，铜、铅、锌先进冶炼技术产能占总产能的85%以上；铜、铝加工能力有较大改善。自主创新能力显著增强，自主研发的具有自主知识产权的350 kA、400 kA大型预焙电解槽技术处于世界铝工业先进水平，并已输出到国外；高精度内螺纹铜管、高档铝合金建筑型材及时速350 km高速列车用铝材不仅满足了国内需求，已大量出口到发达国家和地区。国内矿山新一轮找矿和境外矿产资源开发取得了突破性进展，现有9大矿区的边部和深部找矿成效显著，一批有实力的大型企业集团在海外资源开发和收购重组境外矿山企业方面迈出了实质性步伐，有效增强了矿产资源的保障能力。

2008年9月份以来，我国有色金属工业受到了国际金融危机的严重冲击，产品价格暴跌，市场需求萎缩，生产增幅大幅回落，企业利润急剧下降，部分行业

已出现亏损。纵观整体形势，我国有色金属工业仍处在重要机遇期，挑战和机遇并存，长期发展向好的趋势没有改变。今后一个时期，我国有色金属工业发展以控制总量、淘汰落后、技术改造、企业重组、充分利用境内外两种资源，提高资源保障能力为重点，推动产业结构调整和优化升级，促进有色金属工业可持续发展。

实现有色金属工业持续发展，必须依靠科技进步，关键在人才。为了全面提高劳动者素质，培养一大批高水平的科技创新人才和高技能的技术工人，由中国有色金属工业协会牵头，组织中南大学出版社及有关企业、科研院校数百名有经验的专家学者、工程技术人员，编写了《中国有色金属丛书》。《丛书》内容丰富，专业齐全，科学系统，实用性强，是一套好教材，也可作为企业管理人员和相关专业大学生的参考书。经过编写、编辑、出版人员的艰辛努力，《丛书》即将陆续与广大读者见面。相信它一定会为培养我国有色金属行业高素质人才，提高科技水平，实现产业振兴发挥积极作用。



2009 年 3 月

前 言

本书是在 2003 年出版的《铅锌冶金学》第二章(铅锌及其主要伴生元素和化合物的性质)的基础上,由 9 个主要共、伴生元素扩展到 35 个相关的伴生元素及其无机化合物编写而成的。

2009 年喜逢国家发改委批准在中南大学建立“难冶有色金属资源高效利用国家工程实验室”,这就更加激励我们为促进清洁生产、大力发展循环经济、实现资源高效利用而努力。由于对各相关物质物性本质的认识,可以加深对铅锌联合企业生产过程的认识,从而加速对原有生产工艺的技术改造,促进新工艺、短流程的开发应用。

由于这本数据手册是按教学工具书的要求设计编纂,是为提取冶金工作者选编的,因而倾向于他们的需要和习惯,将收集的数据资料选编为 10 部分。前 8 部分属于化学冶金基础和物理冶金基础:第 1 部分为相关元素的性质导论;第 2 部分为相关元素的无机化合物性质简表;第 3 部分为相关元素和无机化合物的标准热力学数据;第 4 部分为不同体系的化学势图和不同温度(298 ~ 1500 K)下热化学数据;第 5、6、7 部分分别是水溶液中的热力学数据、氧化还原电势数据、元素的氧化态与 E° 关系图及二元系、三元系的 $E - \text{pH}$ 图;第 8 部分是物理冶金基础——状态图。

面对中国的太阳能热水器集热面积和光伏发电容量居世界第一,中国政府 2009 年投资 100 亿元在内蒙古沙漠地区、占地 64 平方公里建设世界最大的碲化镉薄膜太阳能电站(晴天、雨天均可发电)的现实,为引起读者的关注,我们增补了第 9 部分——超导和半导体的特性数据以及第 10 部分——太阳能电池的光学性能。让我们迎接新能源引导的能源革命的世界第四次产业革命的到来。

本书取材覆盖面较宽,涉及的元素包括 10 种有色重金属(铜、镍、钴、铅、锌、铋、镉、锡、锑、汞);8 种贵金属(金、银、铂、钯、铑、铱、钌、钨);7 种稀散金属(镓、铟、铊、锗、硒、碲、镱);有色轻金属的铝、镁、钙;属于黑色金属的铁和锰;还有和太阳能电池有关的硅、砷以及和能源有关的碳、氢、氧。

全书内容丰富,数据较新,例如收集了国内手册不常见的某些化合物可能爆炸的发生条件,挑选了 99 种美国科学技术数据委员会公布的有关元素和化合物

的标准热力学数据。

此外，本书还用较大篇幅收集了 107 幅状态图，建议读者重视和利用这一物理冶金基础，充分利用状态图特点开发出新的短流程。

在组织编写本书过程中，得到了中南大学冶金科学与工程学院和中南大学出版社的大力支持。李洪桂、赵秦生及冶金原理教研室的各位老师对该书的总体结构提出了很好的意见。在编写过程中编者参考了大量的国内外文献，感谢他们字斟句酌、精益求精的作品(尤其有的问世已经 10 年、甚至 10 年以上)给了我们和广大读者这些非化学专业科班出身的人，温习和再学习化学冶金基础知识和物理冶金基础知识以及新能源知识的机会，他们的学术见解和风格有益于教学和人才培养。

本书第 1 及 9、10 部分由任鸿九选编，第 2、3、5、6 及 7 部分由赵中伟选编，第 4 部分由陈爱良选编，第 8 部分由滕明珺选编。全书由冶金专业的赵中伟及任鸿九进行修改及总纂定稿，化学专业的刘常青对样书初稿提出了许多中肯的修改意见，从而使数据手册中一些化学学科的概念、术语更确切，更加与时俱进。由于参编人员水平有限，书中难免有很多不足及错漏之处，恳请读者批评指正。

限于选编者水平，错误与不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 11 月

目 录



1 铅锌及其共伴生元素的物理化学性质导论	1
1.1 铅锌及其共伴生元素在元素周期表中的位置	1
1.1.1 铅锌及其共伴生元素在元素周期表中的位置	1
1.1.2 铅锌及其共伴生元素的丰度和克拉克值	3
1.2 铅锌及其共伴生元素的主要物理化学性质简表	3
1.3 铅锌及其共伴生元素的物理性质	13
1.3.1 电子层结构	13
1.3.2 极化率	14
1.3.3 熔点、熔化焓、沸点、汽化焓	16
1.3.4 磁化率	16
1.3.5 不同温度下的蒸气压	19
1.3.6 不同温度下的密度、表面张力、黏度	19
1.3.7 铅锌的放射性同位素	20
1.4 铅锌及其共伴生元素的化学性质	22
1.4.1 电离能	22
1.4.2 粒子半径	25
1.4.3 电子亲和能	30
1.4.4 离子势	31
1.4.5 元素电负性	32
1.4.6 标准氧化还原电势	35
2 铅锌及其共伴生元素无机化合物的物理性质	38
2.1 无机化合物的物理性质简表	38
2.2 熔化焓、汽化焓	80
2.3 黏度	85
2.4 介电常数	86

2.5	不同温度下无机化合物在纯水中的溶解度	92
2.6	溶度积	97
2.7	热导率	99
2.8	水的各种数据	100
2.9	空气的热力学数据	105
2.10	氮的热物理数据	107
2.11	某些电解质的溶解热焓	109
2.12	HF、HCl、HBr、HI 溶液的摩尔电导率	110
2.13	酸、碱、盐溶液的活度系数	111
2.14	部分纯金属和合金的电阻率	113
2.15	离子晶体的晶格焓和多原子离子的热化学半径	119
2.16	元素和无机化合物的磁化率	124
2.17	无机液体的折射率	129
3	铅锌及其共伴生元素和化合物的标准热力学数据	130
3.1	美国科学技术数据委员会有关铅锌及其共伴生元素和化合物的部分热力学数据	131
3.2	有关元素和无机化合物的部分标准热力学数据	134
4	化学势图及不同温度下的部分热化学数据	152
4.1	化学势图	152
4.1.1	氧势图	152
4.1.2	硫势图	152
4.1.3	氯化物的 $\Delta G^\ominus - T$ 图和氧化物的氯化反应 $\Delta G^\ominus - T$ 图	152
4.1.4	硫化物焙烧反应过程的氧势 - 硫势图	155
4.1.5	硫化矿熔炼过程的 M - S - O 系氧势 - 硫势图	158
4.2	不同温度下部分物质的热化学数据	160
5	水溶液体系的热力学数据	194
6	水溶液中有关电极反应的标准氧化还原电势	202
6.1	标准氧化还原电势	202
6.2	元素的氧化状态与氧化还原电势的关系	215
7	$E - \text{pH}$ 图(普巴图)	222
7.1	铅锌及其共伴生元素与 H_2O 的二元系 $E - \text{pH}$ 图	223
7.2	某些伴生元素的三元系 $E - \text{pH}$ 图(25°C)	245

8 状态图	250
8.1 水的状态图	250
8.2 碳的状态图	250
8.3 纯金属的晶体结构	251
8.4 同素异构转变	253
8.5 纯金属的状态图	255
8.6 二元系状态图概况	258
8.7 铜合金的状态图(二元系、三元系及四元系)	260
8.8 铅合金的状态图(二元系)	266
8.9 锌合金、铁合金以及镍合金等的状态图	278
8.10 铋系和渣系的状态图	283
8.11 碱法炼铅系统的状态图 ($\text{PbS} - \text{Na}_2\text{S} - \text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{NaOH}$ 系)	298
9 超导和半导体的特性数据	301
9.1 超导(Superconductivity)	301
9.1.1 超导体的基本性质	301
9.1.2 BCS 理论	302
9.1.3 部分元素和超导体的超导特性和 T_c 值	303
9.2 半导体(Semiconductor)	307
9.2.1 材料的电学性能	307
9.2.2 原子在半导体中的扩散数据	309
10 太阳能电池材料的光学性能	321
10.1 新能源和太阳能的直接应用	321
10.2 光电转换材料的工作原理	321
10.3 太阳能电池发展的三次技术革新浪潮	322
10.4 单晶硅电池的光学性能	323
10.5 太阳能薄膜电池的光学性能	325
主要参考文献	335

1 铅锌及其共伴生元素的物理化学性质导论

铅锌及其共伴生元素和化合物的物理性质和化学性质,可以相应地称为宏观性质和微观性质。固体的结晶形状、硬度、密度、膨胀系数、弹性模数等力学性质,晶格能、热容、热导率、转变点、熔点、升华点、熔化焓、升华焓等热学性质,光吸收(色)、电离能、电导率、磁化率等电(学)性质,液体的密度,黏度、热容、膨胀系数、蒸气压、沸点、溶解焓、混合焓、平衡常数、分配系数、扩散系数、沸点上升(熔点下降)等性质,通常视为物质的宏观性质,统称为“物性”,而反应性或其他表现原子与分子特性的结构性质则用“结构”的术语来表示其为物质的微观性质。

金属的性质和用途是相关的。为了合理利用铅锌及伴生金属,改进和开发新的生产工艺、研制新材料,需要加深对宏观世界观性质变化规律的认识,需要尽可能利用微观测试手段进行研究和分析。

考虑铅锌及其共伴生元素在元素周期表中分别属8, 9, 10; 11; 12; 13; 14; 15 及 16 族,为比较其元素性质,本书利用了相关的其他元素数据和前人整理的图表来显示其相应的规律。

1.1 铅锌及其共伴生元素在元素周期表中的位置

铅锌冶金过程所用的原料一般含有铅、锌、镉、铋、砷、锑、锡、汞等主要伴生元素。在铅锌主金属生产过程,需要深度净化分离除去对生产有害的伴生元素,这样也使伴生的少量金属得到富集,为综合回收原料中的有价金属(或半金属)创造了条件。国内外生产实践证明,现代的铅锌联合企业不仅生产了大量的主金属(铅锌)和副产品硫酸,还综合回收了镉、铋、铜、镍、钴、锡、锑、汞等重金属,金银及铂金属和稀散金属镓、铟、铊、锗、硒、碲。此外,产出相当数量的冶金炉渣和浸出渣中常常含有相当多的铁氧化物及含钙、铝的硅酸盐。

特别值得指出的是伴生金属中有的已成金属生产的主要来源,例如从铜铅阳极泥及炼锌浸出渣等冶金副产物中提取银,据统计 1989 年中国从伴生银矿中产出的银占银总量的 70%。90% 的铟是从铅锌工业的副产物中提取。绝大多数的镓来自锌冶炼的中间产物铜镉渣和镉灰。

1.1.1 铅锌及其共伴生元素在元素周期表中的位置

本书所圈定的 30 个共生伴生元素恰如图 1-1 元素周期表中用粗黑线框住的 9 族 30 个元素,分别是:

8 族 Fe, Ru, Os; 9 族 Co, Rh, Ir; 10 族 Ni, Pd, Pt;

11 族 Cu, Ag, Au; 12 族 Zn, Cd, Hg; 13 族 Al, Ga, In, Tl;

14 族 Si, Ge, Sn, Pb; 15 族 As, Sb, Bi; 16 族 O, S, Se, Te。

此外,还考虑收集与铅锌冶金过程的能源与造渣等相关的 C、H、Ca、Mg 与 Mn 5 个元素

族 周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh		118 Uuo

镧系	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
锕系	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

图 1-1 元素周期表中铅锌及其共伴生元素的位置

的资料。

铅锌和伴生元素连同附加的 5 种共计 35 种元素，其中属于半金属 (Semimetals) 的有 Si、Ge、As、Sb、Te 5 个 (框外还有 B、Po、At 3 个)；属于非金属 (Nonmetals) 的有 O、S、Se 及补加的 C 4 个 (框外还有 N、P、F、Cl、Br、I 和惰性元素 He、Ne、Ar、Kr、Xe、Rn 共 12 个)；属于金属的有 Fe、Ru、Os、Co、Rh、Ir、Ni、Pd、Pt；Cu、Ag、Au；Zn、Cd、Hg；Al、Ga、In、Tl；Sn、Pb、Bi 及 H、Ca、Mg、Mn 26 个。

从冶金工程角度看这 35 个元素包括了属于黑色金属的铁锰；属于有色重金属的铜、铅、锌、镍、钴、铋、镉、锡、锑、汞；属于有色轻金属的铝、镁、钙；全部贵金属——金、银、铂、钯、铑、铱、钐和除铯^①外的其余全部稀散金属——镓、铟、铊、铷、铯、钫和除铯^①外的其余全部稀散金属——镓、铟、铊、铷、铯、钫；还有和太阳能电池有关的硅、砷；以及与能源有关的碳、氢、氧。可以看出本书选定的框图的覆盖面恰与铅锌资源高效利用的目标相符。按照元素周期表的排列规律来认识各相关物性，可以加深对铅锌生产过程的认识，从而加速对原有工艺的技术改造，促进新工艺的开发。

由于不同国家或地区、不同时代对元素周期表的分族命名形式采用了不同的习惯表示，给非化学专业出身的冶金工程专业的读者带来一些“不同符号”的麻烦，在此作一归纳对比说明，并建议读者尽可能采用新的形式表示。

注：①后面有关部分，实际上添加了铯的内容。

对元素周期表中分族命名的新老形式如下：

(4)	I A	II A	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII或VIII B				I B	II B	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	O或VIII A
	I A	II A	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIII或VIII A				I B	II B	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	O或VIII B
	I	II	← 过渡元素 →										III	IV	V	VI	VII	VIII	
(2)	族 周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
(1)																			

表示分族命名的新老形式：(1)为推荐的现代形式；(2)另一种更新的形式(近年来出版的化学书中常见)；(3)欧洲习惯的形式(英国出版的书中常见，中译本书中也常见)；(4)北美习惯的形式(美国出版的书中常见)。

1.1.2 铅锌及其共伴生元素的丰度和克拉克值

《现代化学原理》将元素表中元素在地壳中丰度(Abundances by mass)分为6个层次，本书中涉及的元素在6个范围内分别属于：

- (1) >0.1% 有 O、Si、Al、Ca、Mg、Fe、Mn 和 H；
- (2) 0.01% ~0.1% 有 C、S、Zn；
- (3) 0.001% ~0.01% 有 Co、Ni、Cu、Ga、Pb；
- (4) 0.0001% ~0.001% 有 Tl、Ge、Sn、As、Sb；
- (5) 10⁻⁶% ~10⁻⁴% 有 In、Bi、Se、Pd、Pt、Au、Ag、Cd、Hg；
- (6) <10⁻⁶% 有 Te 及 Ru、Os、Rh、Ir 及新补加的 Re。

《元素》将这些元素的克拉克值(Earth's crust)以 ppm 表示(即 10⁻⁶)。上述元素的克拉克值分别为：

O 474000；Si 277100；Al 82000；Ca 41000；Fe 41000；Mg 23000；H 1520；Mn 950；C 480；S 260；Ni 80；Zn 75；Cu 50；Co 20；Ga 18；Pb 14；Sn 2.2；Ge 1.8；As 1.5；Sb 0.2；Cd 0.11；Ag 0.07；Hg 0.05；Se 0.05；Bi 0.048；Te 0.005；In 0.0049；Au 0.0011；Ru 0.001；Pt 0.001；Re 4 × 10⁻⁴；Pd 6 × 10⁻⁴；Rh 2 × 10⁻⁴；Os 1 × 10⁻⁴；Ir 3 × 10⁻⁶。

据国内外有色金属与煤资源的储量基础数据，中国在世界的排名顺序，铅、锌分别居第一位，铜居第三位，煤居第三位，铝居第五位。稀散金属与铅锌矿量的比值关系中， $m(\text{Ge})/m(\text{Pb}, \text{Zn}) = 1/29858$ 及 $m(\text{In})/m(\text{Pb}, \text{Zn}) = 1/7362$ ，即铅锌矿量新增 30000 t 约可新增 1 t Ge 和 4 t In。另据 Se、Te/Cu 的数据，西方国家每产 10000 t 铜即可回收 2.6 ~5.8 t Se 和 0.6 t Te；我国相应为 2.15 t Se 和 0.6 t Te。依此可预测稀散金属潜在储量，可见铅锌矿源的增加将增加钼、锗储量，铜矿源的增加，硒碲储量也将增加。

1.2 铅锌及其共伴生元素的主要物理化学性质简表

为方便查找有关主要物理化学性质数据，分别整理归纳为 8, 9, 10 族元素(或老 VIII 族元素)(Fe、Co、Ni、Ru、Rh、Pd、Os、Ir、Pt)为表 1-1, 11 族元素(或老 IB 族元素)(Cu、Ag、Au)为表 1-2；12 族元素(或老 II B 族元素)(Zn、Cd、Hg)为表 1-3；13 族(或老 III A 族)元