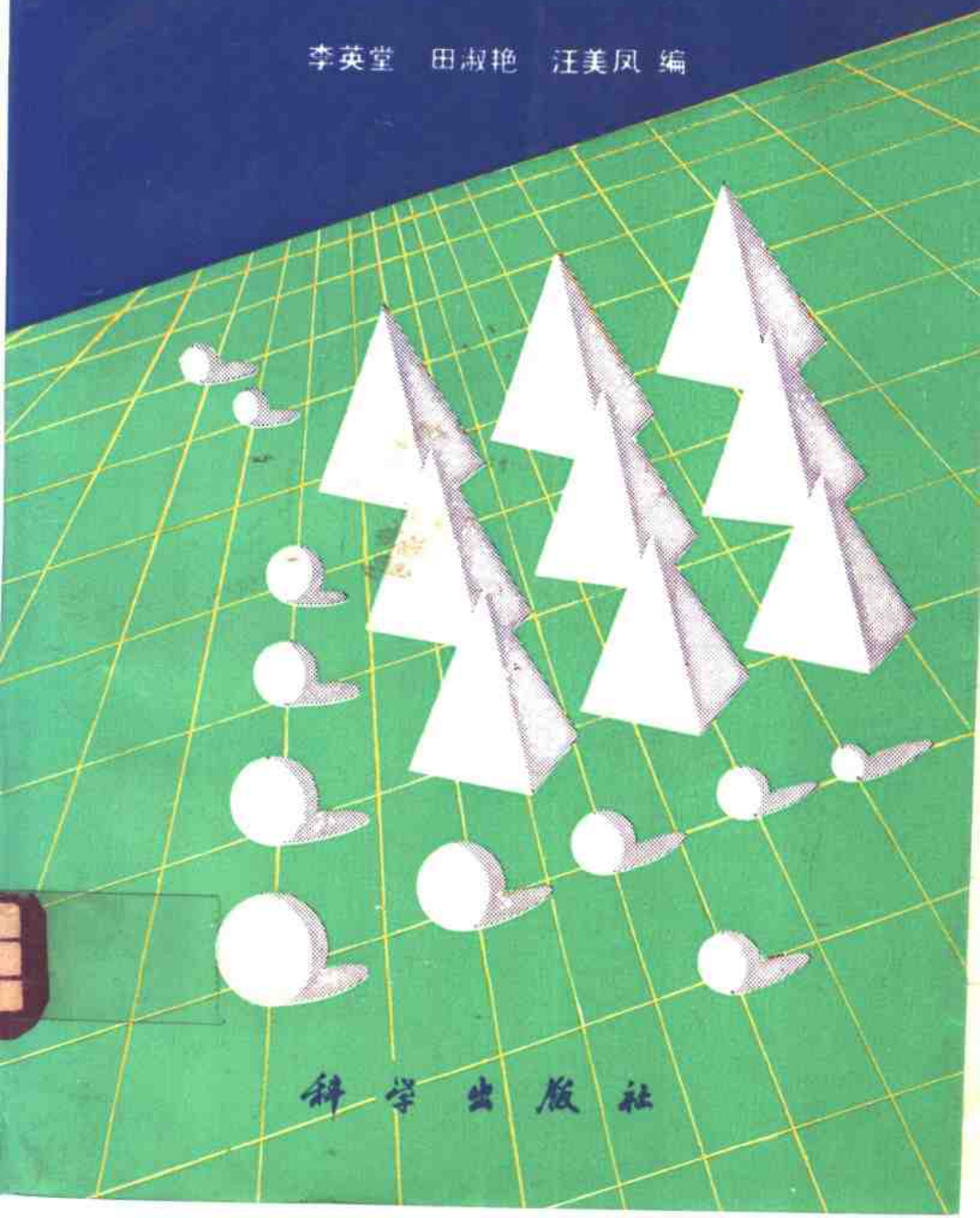


# 应用矿物学

李英堂 田淑艳 汪美凤 编



科学出版社

122  
32  
4

# 应 用 矿 物 学

李英堂 田淑艳 汪美凤 编

科 学 出 版 社

1995

(京) 新登字 092 号

## 内 容 简 介

全书共分八章, 简明论述了矿物的化学成分及分类, 矿物晶体化学, 量子矿物学和矿物物理学的基本理论; 叙述了矿物的物理化学和热学性质; 列出了矿物的各种物理参数; 并着重系统详细地论述了“应用矿物学”在选矿工艺和冶金工艺中的价值和研究方法, 还列举了一些主要非金属矿物的加工利用实例。

本书最适用于从事矿冶工程、建材、轻工、化工原料和材料科学等方面科研、生产的人员, 对其工作和提高业务水平都有实用价值。

## 应 用 矿 物 学

李英堂 田淑艳 汪美凤 编

李高山 葛书华 审

责任编辑 周长青 郭晓燕

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100-11

三河市新世纪印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1995年3月第1版

开本: 850×1168 1/32

1995年3月第一次印刷

印张: 11 3/4 插页: 2

印数: 1-1019

字数: 302 400

ISBN 7-03-004277-8/P·722

定价: 13.90 元

# 目 录

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 第一章 绪言 .....                  | (1)   |
| § 1.1 应用矿物学的基本概念 .....        | (1)   |
| § 1.2 应用矿物学与矿物学各分支学科的关系 ..... | (3)   |
| § 1.3 应用矿物学在国民经济中的作用 .....    | (5)   |
| 第二章 矿物的化学成分及分类 .....          | (7)   |
| § 2.1 矿物的化学成分 .....           | (7)   |
| § 2.2 元素的结合规律 .....           | (8)   |
| § 2.3 矿物晶体化学式 .....           | (20)  |
| 第三章 矿物晶体结构与晶体化学 .....         | (27)  |
| § 3.1 矿物晶体结构 .....            | (27)  |
| § 3.2 矿物的晶体化学 .....           | (31)  |
| § 3.3 化学键 .....               | (44)  |
| § 3.4 矿物物理学 .....             | (78)  |
| 第四章 矿物的物理性质及表面性质 .....        | (96)  |
| § 4.1 矿物的比重和密度 .....          | (96)  |
| § 4.2 矿物的发光性 .....            | (98)  |
| § 4.3 矿物的力学性质 .....           | (100) |
| § 4.4 矿物的磁性 .....             | (113) |
| § 4.5 矿物的电性 .....             | (153) |
| § 4.6 矿物表面性质和可浮性 .....        | (173) |
| 第五章 矿物的热学性质 .....             | (189) |
| § 5.1 与热分析有关的热物理参数 .....      | (189) |
| § 5.2 矿物的热导率和比热 .....         | (190) |
| § 5.3 矿物的热重和差热分析 .....        | (193) |
| § 5.4 矿物的热膨胀性 .....           | (196) |
| 第六章 选矿工艺中应用矿物学 .....          | (216) |
| § 6.1 矿物含量的测定方法 .....         | (216) |
| § 6.2 矿物粒度及粒度测定 .....         | (244) |
| § 6.3 矿石的结构、构造, 矿物的嵌布特征 ..... | (253) |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| § 6.4 元素配分与平衡系数计算 .....        | (257) |
| § 6.5 选矿工艺中应用矿物学研究实例 .....     | (260) |
| 第七章 冶金过程中的应用矿物学 .....          | (274) |
| § 7.1 相平衡 .....                | (274) |
| § 7.2 冶金过程中应用矿物学的研究内容和方法 ..... | (290) |
| 第八章 非金属矿物加工与利用 .....           | (298) |
| § 8.1 非金属矿产的分类 .....           | (298) |
| § 8.2 高岭土 .....                | (300) |
| § 8.3 硅灰石 .....                | (316) |
| § 8.4 蓝晶石族矿物 .....             | (321) |
| § 8.5 叶蜡石 .....                | (328) |
| § 8.6 滑石 .....                 | (334) |
| § 8.7 膨润土 .....                | (337) |
| § 8.8 石墨 .....                 | (347) |
| 参考文献 .....                     | (351) |

# 第一章 绪 言

## § 1.1 应用矿物学的基本概念

矿物学作为地质科学的基础已有了比较完整的经典理论体系,和应用广泛的成熟的研究手段。然而随着社会生产力的发展,现代科学技术的进步,矿物学研究已不再单纯地服务于地质科学。近代物理化学理论及先进测试技术的引入,进一步揭示了矿物各种性质的本质,使矿物在化工、轻工、建材、陶瓷、冶金、国防、农业等部门得到更广泛地应用,从而使矿物学的研究范围和深度在诸多领域得以拓宽。近年来,除经典矿物学、工艺岩石学、找矿矿物学、实验矿物学不断完善和发展外,量子矿物学、矿物物理学、选矿工艺矿物学、冶金工艺矿物学、矿物材料及合成工艺学等也引起了学者们的高度重视。无论是选、冶工艺矿物学还是矿物材料及合成工艺学,都是在实用技术或工艺流程中研究矿物性状的变化及应用价值,我们将这些研究内容统称为应用矿物学。应用矿物学实际上是矿物学与工艺学之间的过渡科学,是矿物学与矿物资源综合利用之间的桥梁和纽带,它的兴起与发展是现代科学理论和技术进步的必然产物。

经典矿物学理论与现代固体物理学、量子化学的有机结合,形成了应用矿物学的基础理论。矿物是地壳中化学元素经各种物理化学作用形成的天然无机晶体、非晶质固体,并以其各种组合方式呈岩石或矿石状态存在于自然界中。矿物学研究的主要内容是矿物的成因产状、矿物间的相互关系、矿物的化学组成、晶体结构、晶体形态、物理化学性质等。应用矿物学是在传统矿物学研究的基础上,探讨矿物工艺性能的本质和变化,及其与化学成分、物理-化学性质、晶体结构、矿物表面的化学态和电子结构的关系。

由此可见，应用矿物学理论实际上是经典矿物学理论的深化。应用矿物学的研究方法是以传统矿物学的研究方法为本，依赖各种先进测试仪器进行探测。

在地质普查勘探过程中，应用矿物学的研究任务是查清矿体和岩体的矿物组成、化学成分、元素含量及其赋存状态、有用矿物的工艺性能及其与脉石矿物的嵌布关系，研究随矿体的开采，矿体中矿物的可选治性的变化规律。为评价矿石的可采性及可利用程度提供基础资料。

在选冶工艺中，应用矿物学作为矿石的分离提取工艺的研究基础，其主要任务是研究选、冶原料的物质组成，元素的赋存状态和配分，有用矿物与脉石矿物的嵌布粒度、形态、解离特性，有用矿物的物理性质、化学性质、晶体结构、表面结构、表面化学成分及化学态，矿物与元素在选、冶工艺中的走向和行为，以及上述特性与其工艺性能的关系。以上研究结果是选择和制定合理的选冶工艺方案、评价技术经济指标、改善流程结构必不可少的依据。

非金属矿物广泛地应用于诸如机械工业用铸型砂、粘结剂、脱模剂、磨削矿物、润滑矿物等；化工、环保、食品加工业用吸附剂、脱色剂、澄清剂等；造纸、塑料等轻工业用的各种原料填充剂；农药、饲料中的载体矿物；冶金熔剂、耐火材料、陶瓷原料等等。这些应用的先决条件是通过应用矿物学研究完成，非金属矿物品质的确定与选择。如，耐火材料是高铝矿物、菱镁矿等非金属矿物经煅烧后形成的新矿物相。这些非金属矿物的化学成分、晶体结构、热力学性质、高温相变特征都是影响耐火材料质量的关键。查清矿物在一定物理化学条件下的生成顺序、空间关系、晶体变化规律，研究其相变机理，对于选择生产耐火材料的最佳原料、最佳物理-化学条件是至关重要的。此外，应用矿物学在矿物材料合成（人造宝石的合成、天然宝石的处理等）、尖端科技材料（光学材料、超导材料、磁性材料等）等方面的研究应用也是相当重要的。

## § 1.2 应用矿物学与矿物学 各分支学科的关系

应用矿物学的研究以矿物学研究为基础，利用矿物学的研究方法和手段，研究矿物的各种性质，并根据这些性质研究矿物应用范围和应用的可能性。应用矿物学与经典矿物学的分支学科特别是与量子矿物学、矿物物理学、实验矿物学关系密切（图 1-1）。

自然界中绝大多数矿物呈晶质状态存在，研究矿物实际上是研究矿物的结晶体。晶体的化学和结构特征决定了矿物的各种固有性能，决定了矿物利用价值。因此，晶体化学、晶体结构学是经典矿物学的核心，也是应用矿物学的核心。

量子矿物学和矿物物理学是新兴的边缘科学。它运用固体物理、量子化学的基本理论和现代实验测试技术研究矿物的电子结构、化学键特性、结构畸变及缺陷、电子能量的变化等；揭示矿物宏观表现出的光性、电性、磁性、力学性能、热力学性质、表面态、化学吸附反应等本质。量子矿物学和矿物物理学使矿物在各种工艺过程中的行为变化得到了确切的解释，推动了矿物新用途的开拓，促进了矿物材料的研究。为此，材料科学工作者也十分重视量子矿物学和矿物物理学的研究。在应用矿物学研究中，往往必须通过矿物物理学和量子矿物学的研究，才能了解并控制各种矿物性能的变化，扩大矿物应用范围，充分地综合利用矿物资源。可见，量子矿物学和矿物物理学是应用矿物学的研究基础。

实验矿物学是研究矿物合成以及在各种条件下模拟和探索矿物形成过程的一门矿物学分支学科。实验矿物学主要研究在各种物理化学条件下，对矿物稳定性、结晶特征、晶体生长、晶体缺陷和位错等产生的影响。实验矿物学的研究成果不仅为成矿理论提供基础资料，也为解决高新技术领域功能材料的合成提供了重要的方法和途径。水热法和高温法是矿物合成中两种主要方法，目前，金刚石、红宝石、云母、淡红银矿、金红石等矿物单晶的合

成已投入工业化生产。实验矿物学的研究,在解决矿物合成工艺、矿物相变机理方面具有重要意义。实验矿物学与应用矿物学研究内容具有共同之处,在某些方面,实验矿物学是应用矿物学向工艺学的进一步延伸。

矿物标型特征是岩石及矿床形成条件在矿物载体上的具体反映。成因矿物学和找矿矿物学就是通过对矿物标型特征的研究,解决岩石和矿床的成因问题,为研究成矿规律、确定找矿方向提供矿物学依据。可见,成因矿物学和找矿矿物学也同选冶工艺矿物学、矿物材料工艺学一样,是矿物学通向生产实践的桥梁,也是应用矿物学的重要组成部分。

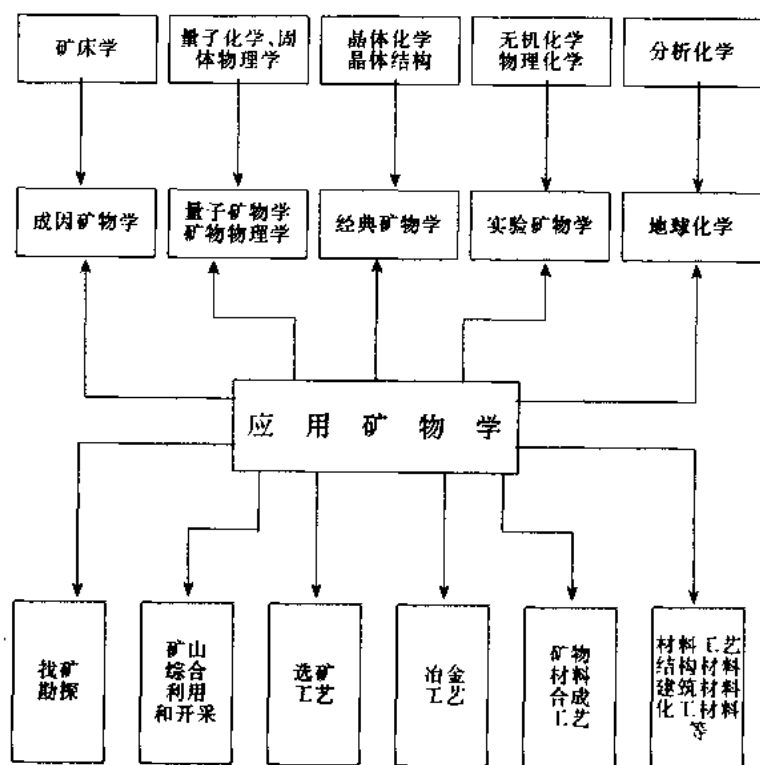


图 1-1 应用矿物学与矿物学各分支学科及生产工艺之间的关系

学科间的交叉和渗透是促进科学发展的重要因素。从应用矿物学与矿物学各分支学科和生产工艺之间的关系(图 1-1)不难看出,应用矿物学的理论基础是晶体化学、晶体结构学、量子矿物学和矿物物理学,它的研究范围囊括于众多的工业领域之中,如找矿勘探,矿山的采、选、冶生产,矿物材料深加工及矿物材料合成等等。

### § 1.3 应用矿物学在国民经济中的作用

尽管目前已发现自然界中存在的 93 种元素组成了 3300 多种矿物,但被利用的矿物仅有 150 余种。同时,易采、易选、易冶的矿物原料日趋枯竭,被工业利用的有限的矿物原料又有相当数量损失于采、选、冶工艺过程中。矿产资源危机已成为当今世界令人瞩目的问题。不仅采、选、冶工业面临着加速提高原有技术水平,以适应综合开发利用新、杂、微、细贫矿石的问题,同时,原材料工业也必须不断地挖掘资源潜力,开发矿物的新用途。这一切都与应用矿物学的研究有关。

应用矿物学的研究是从矿物学的角度,为采、选、冶工艺技术的改进,陶瓷、耐火材料、磨料、化工、造纸等等材料工业中原料的选择、精制,以及高技术材料的开拓提供了基本保证。工业实践证明,应用矿物学研究对工业生产的发展和完善起到了至关重要的作用。我国几个重大的钢铁工业、有色冶金工业基地的矿物资源综合利用,都是以矿石的工艺矿物学研究为先导。例如,对金川硫化铜镍矿、攀枝花钒钛磁铁矿、白云鄂博稀土矿、辽宁凤城含铀铁硼矿等矿山的开发,矿石的工艺矿物学研究,都为扩大储量、提高矿物综合利用系数、旧流程的改造、主流程的设计、产品结构的改善,提供了大量的基础资料和可靠的科学依据。

由于应用矿物学的发展,使新的矿物材料不断地应用于高科技领域,如激光技术用的蓝宝石、钛玻璃、钇铝石榴石;光缆通讯用的石英光导纤维;陶瓷工业已进入了工程技术陶瓷研制阶段,

不久的将来，工程技术陶瓷将取代更多金属材料和其它材料，使经济社会出现重大变革。陶瓷原料——非金属矿物的形成、性状、变化的详细研究资料是陶瓷生产工艺的基础，生产高技术工程陶瓷离不开应用矿物学的研究。

总而言之，应用矿物学的研究是工业、农业、材料工业发展的动力，没有应用矿物学的理论研究和科学实验，工农业生产、原材料工业的发展及其科学技术水平的提高将停滞不前。

综上所述，应用矿物学以晶体结构和晶体化学、量子矿物学和矿物物理学为理论基础，包括了选、冶工艺矿物学，矿物材料及矿物材料合成工艺学，成因矿物学和找矿矿物学等研究内容。根据著者的多年工作实践，本书主要对选、冶工艺矿物学研究及其基本理论和研究方法进行了较详细的论述；对矿物材料及矿物材料合成工艺学，仅从非金属矿物资源深加工及利用的角度作了阐述。

## 第二章 矿物的化学成分及分类

### § 2.1 矿物的化学成分

矿物的形成是地壳中各种化学元素分散、聚集、迁移和运动的结果，是地质作用的产物。化学成分和晶体结构是鉴定矿物必不可少的基本最重要的依据。各种元素在地壳中的平均含量称“克拉克值”，它是每一种元素占地壳总重量的百分比。

既然矿物是地质作用产出的天然化合物，因而它必须服从化学的各项规律，如倍比定律、定比定律等，并且具有一定的化学式。但是，经常发现某些矿物的组成比实验室条件下所制取的化合物要复杂的多，所反应出来的化学现象更为复杂。

矿物的构成成分是由具有一定比例的主要造种元素所构成。这些元素无论在何种成因条件下形成矿物，它们在矿物中的存在量服从化学上的倍比定律或定比定律。然而自然地质作用形成的矿物在化学组成上还存在大量复杂多样的非造种元素，还有为平衡电价所捕获的电子、空穴心等。这些晶格杂质的存在，破坏了矿物组成的正常比例关系，故而将矿物成分分为化学剂量组分和非化学剂量组分。

化学剂量组分是指构成矿物的主要造种元素组分，这些成分按一定的比例构成晶体的理想结构骨架，并且不存在结构缺陷。这些成分也可以部分被类质同象组分所置换，但仍保持阴、阳离子总和的比值不变，保持电价平衡或基本平衡。这类主要组分和痕量组分统称为化学剂量组分。

天然产出的矿物组分极为复杂，除有化学剂量组分（包括众多的痕量组分）外，还有为平衡电价所捕获的附加阴、阳离子和粒子（如电子或空穴）等。这些组分和粒子等进入晶格后破坏了

矿物标准化学式的比例关系，称为矿物的非化学计量组分。

非化学计量组分的存在，对矿物的物理性质产生重大影响。众所周知，矿物的组成成分、组分间的化学键特性以及结构特性决定了矿物的物理和化学性质。因此，矿物的化学计量组分是决定矿物物理、化学性质的重要因素。非化学计量组分含量虽然极微，但对矿物物理和化学性质的影响不可忽视。例如，成分纯净的金刚石为绝缘体，不具有温差电动势；但如果有少量的  $B^{3+}$  离子代替金刚石晶体中的  $C^{4+}$  离子，由于失去电价平衡便捕获部分空穴形成空穴心，这时的金刚石为半导体，具有空穴心型热电性特征，这种金刚石称为 I<sub>1</sub> 型金刚石，可作为高能电子器件的散热器。矿物材料中的许多功能材料都是由于矿物组分中掺杂有不等价的晶格杂质，使晶格产生缺陷捕获电子心或空穴心，导致矿物改变了原有性质而具有新功能，成为具有特殊用途的功能材料。又如，萤石中含有  $Sm^{2+}$ 、 $Dy^{2+}$ 、 $Nd^{2+}$  时可作为激光材料。

矿物中非化学计量组分除具有含量极微的特征外，与矿物主成分电价不同也是其重要特征，这也是矿物产生各种顺磁心的原因。矿物所具有的各种“心”直接影响矿物的光学、声学、力学、热学和电学性质，因此可看作是矿物组成的非化学计量组分之一。

类质同象置换和矿物中可交换阳离子是造成矿物成分变化的主要原因，本书有关章节将介绍这些内容。

## § 2.2 元素的结合规律

自然界中的元素以化合物或单质状态存在。如氧既以单质氧气 ( $O_2$ ) 状态存在于大气中，又以化合物形式形成多种矿物。地质作用的物理化学环境不同，自然环境中元素的共生关系不同，形成的矿物和矿物集合体（岩石）不同。如 Cu、Pb、Zn 等元素主要形成硫化物，硫化物熔点较低、易于挥发，因此一般富集于中温或低温为特征的硫化物矿床中。而 Nb、Ta、Zr、Hf、REE 等元素易于形成含氧盐类矿物，而富集于酸性或碱性岩浆期后的高温矿床中。在地质作用下，元素的结合规律受浓度、温度、压力等

条件制约,但是元素结合成哪种化合物,主要取决于元素的地球化学亲和性。

### 2.2.1 元素的地球化学亲和性

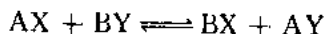
地球化学体系是多元素多相体系,元素的结合表现出强烈的亲和性。如碱金属和碱土金属在地质过程中主要形成硅酸盐、碳酸盐和其它含氧盐类矿物;而Cu、Pb、Zn强烈亲硫而形成硫化物;Au、Pt却形成单质的自然金和自然铂。

在多元素多相地球化学体系中,元素间结合规律服从体系总能量最低法则,即

$$d(\sum \Delta G_i)_{P,T} = 0 \quad (2-1)$$

式中  $G_i$ ——自由能

在多相体系中,元素之间的结合关系取决于交换反应中组合能量的高低。如



反应中,反应向反应式中反应自由能低的一侧进行。例如,



反应中,  $\Delta G_i = -3.28 \text{ kcal/mol}$ , 即  $SnO + FeS$  组合反应自由能降低  $-3.28 \text{ kcal/mol}$ , 因此反应向右侧进行。在Sn、Fe、S、O共存体系中,Sn有明显的亲氧性,而Fe则显亲硫性。

所有元素的结合规律都服从于相体系总自由能最低法则,而体系总自由能由热效应和熵效应两部分决定,

$$\sum \Delta G_i = \sum \Delta H_i - T \sum \Delta S_i \quad (2-2)$$

式中  $\Delta H_i$ ——反应焓;  $\Delta S_i$ ——反应熵。因此体系总自由能最低法则,也就决定了体系的总热焓必须最低,或体系的总熵值最大。这些热力学法则制约着元素在自然界的结合规律。

### 2.2.2 元素的亲氧、亲硫性质

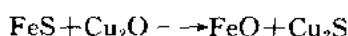
元素的亲氧、亲硫性质一直为地球化学和矿物学工作者

所重视。戈尔德施密特、费尔斯曼、别捷赫金、谢尔宾纳等人都曾利用化合物生成自由能，元素原子的电离势、电负性以及电价、半径等性质讨论元素的不同亲和性。

生成物的生成自由能与反应物生成自由能的关系：

$$\Delta G_{\text{反}} = \sum \Delta G_{\text{生成物}} - \sum \Delta G_{\text{反应物}} \quad (2-3)$$

例如，



这里，

$$\begin{aligned} \Delta G_{\text{反}} &= \sum \Delta G_{\text{生成物}} - \sum \Delta G_{\text{反应物}} \\ &= (\Delta G_{\text{FeO}} + \Delta G_{\text{Cu}_2\text{S}}) - (\Delta G_{\text{FeS}} + \Delta G_{\text{Cu}_2\text{O}}) \\ &= (-58.6 - 20.6) - (-24.0 - 35.4) \\ &= -19.8 \text{ kcal/mol} \end{aligned}$$

因此 Cu 比 Fe 更亲硫。所以某一金属元素（如 Fe）的氧化物生成自由能比该元素的硫化物生成自由能差值大，则表现为亲氧性较强；反之，则表现为亲硫性。

表 2-1 数据从理论上能说明 Ag、Cu、Hg、Pb 等在自然界以硫化物出现；La、Mg、Na、Sn 等都以氧化物及含氧盐产出。

表 2-1 金属氧化物与金属硫化物之间的生成热差及生成自由能差  
(单位 kcal/mol, kcal/mol, \*)

|                                                 | $\Delta H$ | $\Delta G$ |                                                 | $\Delta H$ | $\Delta G$ |
|-------------------------------------------------|------------|------------|-------------------------------------------------|------------|------------|
| $\text{La}_2\text{O}_3 - \text{La}_2\text{S}_3$ | -62.54     | —          | $\text{NiO} - \text{NiS}$                       | (-34.16)   | (-30.37)   |
| $\text{MgO} - \text{MgS}$                       | -62.10     | —          | $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{Bi}_2\text{S}_3$ | -31.03     | -25.83     |
| $\text{MnO} - \text{MnS}$                       | -51.41     | -45.78     | $2\text{MoO}_3 - 3\text{MoS}_2$                 | -30.69     | -23.70     |
| $\text{SnO} - \text{SnS}$                       | -47.84     | -42.62     | $\text{CdO} - \text{CdS}$                       | -30.65     | -24.61     |
| $\text{Sb}_2\text{O}_3 - \text{Sb}_2\text{S}_3$ | -47.33     | -36.39     | $\text{PbO} - \text{PbS}$                       | -28.94     | -22.37     |
| $\text{FeO} - \text{FeS}_3$                     | -41.86     | -36.56     | $\text{CuO} - \text{CuS}$                       | -24.5      | -18.6      |
| $\text{FeO} - \text{FeS}_2$                     | -41.86     | -36.21     | $\text{HgO} - \text{HgS}$                       | -10.60     | -5.1       |
| $2\text{WO}_3 - 3\text{WS}_2$                   | -42.07     | -36.02     | $\text{Cu}_2\text{O} - \text{Cu}_2\text{S}$     | -15.75     | -10.28     |
| $\text{ZnO} - \text{ZnS}$                       | -41.64     | -35.93     | $\text{RuO}_2 - \text{RuS}_2$                   | -2.75      | —          |
| $\text{CaO} - \text{CaS}$                       | -40.56     | -34.32     | $\text{Ag}_2\text{O} - \text{Ag}_2\text{S}$     | -0.11      | +6.34      |
| $\text{CoO} - \text{CoS}$                       | -37.68     | -30.63     |                                                 |            |            |

\* 脚标 O 代表氧化物，S 代表硫化物，1 kcal = 41868 J。

自然界地球化学体系趋向于能量最低，所以普遍存在着元素原子电价对应结合规律、半径对应结合规律以及键性对应结合规律。金属元素亲硫或亲氧也受这些因素的支配。一般与硫结合的是阳离子电负性较大、半径较大、电价不太高的元素原子。对于同一金属而言，其高价阳离子易与氧结合，低价阳离子易与硫结合。这些规则与前述的能量效应相一致。

### 2.2.3 元素结合规律与物理化学环境

元素结合规律受多元素多相体系能量最低法则的制约，化合物的生成自由能 ( $\Delta G$ ) 为地球化学环境指数 (温度、压力、组分浓度等) 的函数。显然各种地球化学的介质条件，包括温度、压力、氧化还原条件、酸碱度等，均对元素结合规律施加影响，而且这些介质条件之间相互联系。

例如氧逸度、硫逸度对氧化物、硫化物形成的影响很大。逸度与压力 ( $P$ ) 有如下关系，

$$f = \gamma P \quad (2-4)$$

式中  $\gamma$ ——逸度系数； $f$ ——逸度； $P$ ——压力。化合物在一定的氧逸度条件下才稳定。如  $\text{Cu}_2\text{O}$  (赤铜矿) 稳定氧逸度须大于  $10^{-20} \times 10^5 \text{Pa}$ ；自然铜稳定氧逸度须小于  $10^{-30} \times 10^5 \text{Pa}$ ，所以自然铜在大气中将转化为赤铜矿。

元素形成氧化物或硫化物，与氧逸度和硫逸度有关。氧逸度 ( $f_{\text{O}_2}$ ) 与硫逸度 ( $f_{\text{S}_2}$ ) 的平衡关系式为

$$\lg f_{\text{O}_2} = -13.5 + \lg f_{\text{S}_2} \quad (2-5)$$

以铜、铁为例，从 (2-5) 式得知，体系中  $f_{\text{O}_2}$  增高，自然铜、自然铁以及铜、铁的硫化物都将转变为氧化物；当  $f_{\text{S}_2}$  增加时，则铜、铁的氧化物也将转变成硫化物，这就是在某些热液作用下磁铁矿被黄铁矿交代的原因。当  $f_{\text{O}_2} = 10^{-20} \times 10^5 \text{Pa}$ 、 $f_{\text{S}_2} = 10^{-11} > 10^{-10} \text{Pa}$  时，也可见到  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  与  $\text{Cu}_2\text{S}$  共生。

表 2-2 列出了某些矿床的矿石中元素和矿物的共生组合。

表 2-2 矿石中元素和矿物的共生组合

| 矿 石                   | 组 合 元 素                     | 共生组合矿物                                     |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|
| 超基性和基性岩中的岩浆岩矿床        |                             |                                            |
| 铬铁矿矿石                 | Cr, Fe, Mg                  | 铬铁矿, 橄榄石, 辉石, 自然铂, 亮钨铁矿                    |
| 铂矿石                   | Pt (Os, Ir), Fe             | 铬铁矿, 橄榄石                                   |
| 钛磁铁矿矿石                | Fe, Ti, V                   | 磁铁矿, 钛铁矿, 赤铁矿, 辉石, 基性斜长石                   |
| 铜-镍硫化物矿石              | Ni, Cu; (Pt, Pd, Co)        | 磁黄铁矿, 镍黄铁矿, 黄铜矿, 磁铁矿, 铂族元素矿物               |
| 酸性和碱性伟晶岩              |                             |                                            |
| 锡-铌-锂矿石               | Sn, W, Li                   | 锡石, 黑钨矿, 锂辉石, 长石, 石英, 云母                   |
| 独居石矿石                 | TR, 铈族, Th                  | 独居石, 长石, 白云母                               |
| 铌矿石                   | Nb, Ta, Ti, TR, 铈族          | 烧绿石, 钛铁矿, 金红石, 榍石                          |
| 与花岗岩有关的岩浆期后矿床         |                             |                                            |
| 铁矿石                   | Fe (Ca, Al, Si)             | 赤铁矿, 磁铁矿, 石榴石, 辉石                          |
| 铜矿石                   | Cu, Fe (Ca, Al, Si)         | 黄铁矿, 磁黄铁矿, 黄铜矿, 闪锌矿, 磁铁矿, 赤铁矿, 石榴石, 辉石     |
| 钼-铌矿石                 | Mo, W (Fe, Ca, Al, Si)      | 辉钼矿, 白钨矿, 黄铁矿, 磁黄铁矿, 黄铜矿, 闪锌矿, 石榴石, 辉石     |
| 与酸性侵入体基岩有关的岩浆期后(热液)矿床 |                             |                                            |
| 石英-锡石矿石               | Sn (W, Mo)                  | 锡石, 绿柱石, 黑钨矿, 辉钼矿, 辉铋矿, 黄玉, 萤石             |
| 铜和钼-钼矿石<br>(细脉-浸染)    | Cu, Mo                      | 黄铜矿, 黄铁矿, 辉钼矿, 石英, 绢云母, 红柱石                |
| 铅-锌矿石                 | Pb, Zn, Ag (As, Bi, Cu, Ba) | 方铅矿, 闪锌矿, 黄铁矿, 黝铜矿, 黄铜矿, 石英, 方解石, 重晶石, 绢云母 |