

地质矿产部科学技术司 主办
中国地质矿产信息研究院

当代地质 科学技术进展

1 9 9 3

中国地质大学出版社

目 次

金属成矿作用三部曲研究的热点	宋学信(1)
· 主题词:成矿作用 水岩反应 有机质 金矿化 铀矿化 铅锌矿化 黑色页岩 生物成矿作用	
现代活动热液成矿体系研究进展及其意义	刘建明(10)
· 主题词:热液成矿作用 海底热液成矿系统 成矿控制	
80年代后期以来石油地质科技进步的回顾	翁世勛(16)
· 主题词:油气勘查 层序地层学 盆地分析 微相研究 生产地震学	
油气勘查决策软科学研究的兴起与发展	谢秋元(21)
· 主题词:油气勘查 科学决策 勘查战略 新理论	
环境地质学进展	王智济(27)
· 主题词:地质灾害 全球变化 人为作用 环境污染 环境保护	
山地地质灾害研究现状	张杰坤(33)
· 主题词:山区 地质灾害 崩塌 滑坡 泥石流	
我国地下水资源研究的10年进展	曲焕林 张礼中(40)
· 主题词:地下水资源 水资源评价 开发利用	
水文、工程和环境地质地球物理勘查技术的进展	唐大荣 陈礼宾(47)
· 主题词:浅层地震 新仪器 层析成像 水文地质 工程地质 环境地质 地质灾害防治	
钻探工程专家系统研究现状与展望	甘行平(52)
· 主题词:石油钻探 计算机应用 专家系统 金钢石钻进	
水平侧钻施工中地球物理技术的应用及进展	游有志(58)
· 主题词:石油钻探 水平钻井 地震技术 测井	

- 地震勘探技术进展及趋势 杨勤勇(64)
 • 主题词:地震勘探 三维地震 井间地震 叠前偏移 弹性波
- 地球物理层析成像技术的研究现状及发展 宋林平(71)
 • 主题词:地球物理勘查 层析成像 地震波层析成像 地电层析成像
 矿产勘查
- LNT RF-SQUID 在地球物理上的应用研究及其前景 王赤军等(80)
 • 主题词:超量子干涉器(SQUID) 磁法勘探 超导技术 大地电磁 磁力仪
- 油气化探的研究与实践的新进展 朱炳球(87)
 • 主题词:油气化探 新方法 找矿效果 中国 前苏联 美国
- 地球化学晕理论与实践中新进展 李克俭(94)
 • 主题词:地球化学勘查 地球化学晕 负晕 原生晕
- 造山带研究的新进展 翁世劼(100)
 • 主题词:造山带 阿尔卑斯山 岩石圈 深地震探测
- 造山带研究现状与发展趋势 杨巍然(104)
 • 主题词:造山带 板块构造 韧性剪切带 p - T - t - D 轨迹
- 迅速发展的一门矿物学分支:生物矿物学 陈文焕 刘宝良(109)
 • 主题词:生物矿物学 演化 成因类型
- 生物礁研究的某些进展 张明书(117)
 • 主题词:生物礁 比较沉积学 全球变化 同位素地质
- 我国层序地层学新进展 李文汉(122)
 • 主题词:层序地层学 陆相盆地 岩相古地理 成矿作用
- 年轻沉积物年代学的新进展 业渝光(129)
 • 主题词:年轻沉积物 AMS 测年 ESR 测年 MS 测年 光释光测年
- 风沙沉积研究的某些进展 张明书(136)
 • 主题词:风沙沉积 环境标志 相模式

金属成矿作用三部曲研究的热点

宋学信

(中国地质科学院矿床地质研究所)

摘要 金属的来源、搬运和淀积是矿床学和地球化学永具魅力的主题。水-岩反应、有机质与金属富集和现代洋(海)底成矿作用是当前国际上的研究热点之一。

水-岩反应的研究将为地壳和行星表面的许多复杂的天然作用研究提供科学基础。矿物-流体界面化学、成矿作用反应动力学、水-岩反应地球化学模拟、流体-矿物体系中稳定同位素交换以及有关技术手段开发应用是水-岩反应研究领域进展最快和最为红火的。

有机质与金属富集研究在国际上亦颇受青睐,其中以铁的生物成矿作用研究最为久远和详深,铀、金和铅锌矿化与有机质的关系以及含金属黑色页岩也是科学家们关注的焦点。

洋(海)底现代热液硫化物矿床的发现被认为是现代地质科学最重大的具有突破性意义的成就之一。热液丘、黑烟囱、白烟囱等奇妙的海底景观是科学家们直接观察和取样研究的重要对象。洋底硫化物矿床不仅贱金属数量巨大,而且贵金属(金)的潜在价值亦颇为可观。

主题词 成矿作用 水-岩反应 有机质 金矿化 铀矿化 铅锌矿化 黑色页岩 生物成矿作用

对于金属矿床的形成来说,金属的来源、搬运和淀积是矿床学和地球化学研究永具魅力的主题。1991年国际矿床地质学会(SGA)25周年学术会议的论文集就以《金属的来源、搬运和淀积》为标题,202篇论文概括和展示了金属成矿“三部曲”研究现状与未来。

一、热点之一:水-岩反应

水-岩反应(water-rock interaction)有人译为水-岩相互作用,有时亦称为流体-岩石反应和流体-矿物反应。水-岩反应是当代地球化学研究的重要前沿。它对环境科学、能源和自然资源至关重要,可为地壳和星球表面发生的许多复杂天然作用的研究提供科学基础。

国际地球化学与宇宙化学协会专门设立了水-岩反应工作组,并且每3年举办一次国际水-岩反应学术讨论会。最近的第7届国际水-岩反应学术讨论会是1992年7月13日至18日在美国举行的。此外,近年来在一些国际性或区域性的矿床学和地球化学学术会议上,水-岩反应也是一个重要的论题。

1. 矿物-流体界面化学研究发展日新月异

M. F. Hochella 指出“矿物-流体界面地球化学研究正在突飞猛进地发展”,并且列举了该研究领域的11项最新成就:①直接和间接地证明天然界面的化学性质是颇具方向性和非均一性的;②在原子水平上的界面模拟;③用扩展X-射线精细结构(EXAFS)谱学方法直接观察矿物-水界面上的吸附络合物;④穿过方解石近表面的Cd固态扩散作用的谱学观察;⑤查明矿物表面微形貌在界面反应中所具有的特殊作用;⑥矿物溶解基本机制研究的长足进步;⑦用俄歇电子谱、X-射线光电子谱和扫描隧道显微镜对矿物表面的氧化还原反应进行研究;⑧矿物-水界面的光化学基本机理;⑨矿物表面沉淀物吸附作用的辨别方法;⑩矿物表面不均一催化特征的识别;⑪在土壤形成时矿物-水反应所起的特殊作用。

2. 成矿作用中的反应动力学

英国著名矿床地球化学家、《矿床学》杂志的现任主编 D. Rickard 教授在SGA25周年学术会议上指出,成矿作用过程中的动力学效应既包括缓慢的反应,亦包括复杂的反应轨迹;溶液中的配位基交换反应一般认为是很快的,以致于平衡热动力分析可无临界地应用,然而在复杂的天然体系中(例如成矿溶液),特别是配位基交换反应不可能迅速平衡,因为具稳定性不同的金属配位基的络合物之间存在着对抗反应。在谈及硫化物成矿时,他提到硫化物从溶液中形成的机制是很复杂的,包括一个或多个准稳定相;矿石矿物形成轨迹的复杂性对矿物和金属的共生情况及矿石结构有明显影响。

近年来,在地球化学动力学的实验研究方面也取得了新的进展,已能较好地测定矿物反应速度,并用其推算野外的天然反应动力学。

3. 水-岩反应的地球化学模拟

30年来,地球化学模拟研究取得了很大的进展。Plummer等人最近(1991、1992)研究的NETPATH程序可用于处理正演模拟中发现的每个质量平衡反应以便预测最终水的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 。亦可将此程序进一步扩充,进行放射性碳定年。另一个广泛运用的正演模拟程序是PHREEQE及其相关的版本PHRQPTIZ和PHRQXL(Glynn & Parkhurst, 1992)。

地球化学模拟研究最迫切的问题是如何把地球化学模式应用到实际的水文地质环境中去。作为正演模拟的发展,人们把地球化学反应与水文搬运模式相结合,提出了反应-搬运模拟。目前反应-搬运模拟研究主要集中于数值图解,以求解出描述搬运的偏微分方程和一组描述反应动力学的常微分方程,以及描述平衡过程的质量作用与质量平衡的代数方程。作为地球化学前沿的矿物-水反应吸附作用和动力学的地球化学模拟研究相当薄弱,极待加强。

4. 流体-矿物体系中稳定同位素交换

著名地球化学家 J. R. O'Neil, 在第 7 届国际水-岩反应学术讨论会的中心报告“低温下的同位素分馏系数”一节中,分别论述了作为交换媒介的 H_2 、酶的作用和经验的键力计算等问题。他指出,矿物原有同位素的保存问题是稳定同位素研究的主要关注对象,通过对样品的仔细选择与描述以及开发新的分析方法,我们正向对这一问题的透彻理解的方向迈进。此外,岩石、流体和有机质之间相互作用的研究成果可以解释在各种地质环境下表面上看来似乎高深莫测的同位素变异现象。

5. 水-岩反应研究的技术手段

(1) 水-岩反应的实验模拟手段 高温高压缓冲技术、双反应器技术(包括其改进形式)和各种连续流动体系(continuous-flow systems)是进行水-岩反应实验模拟的有效而适用的手段。

(2) 水-岩反应测试技术手段 扫描隧道显微镜(STM)和扫描隧道光谱(STS)的应用是最近 10 年来对表面和界面科学最大的贡献。用 STM 和 STS 技术可以探测吸附物附着前后矿物表面每个部位的电子学状态,并可研究价态、导电状态,揭示矿物表面有效空间内表面键的基本特性。应用电子隧道理论可以更容易和更可靠地解释谱和图像。

表面和界面测试技术有外位(ex-situ techniques)和内位(in-situ techniques)之分。前者是在真空中进行的,诸如 X-射线光电子谱(XPS)、俄歇电子谱(AES)和次级离子质谱(SIMS)等;后者可直接探测矿物-流体界面,诸如拉曼谱、傅立叶变换红外谱(FTIR)、核磁共振谱(NMR)和扩展 X-射线精细结构(EXAFS)。

还有电子激发解吸离子角分布(ESDIAD)的技术,用它可以记录表面吸附物的化学键方向,其时间分辨率小于 10^{-12} s,角度精确度达 1° 以下。这种高精技术可用来研究被吸附的物种的化学动力学以及在额定位置和缺欠位置上表面化学反应的空间特征。

二、热点之二：有机质与金属富集

现已查明，成矿（富集）作用与有机质和生物活动有密切关系的是铁（锰）、铀、金及其他贵金属、铜、铅锌等金属矿种。其中又以铁的生物成矿作用的研究最为久远和详深。

1. 铁的生物矿物与铁的生物成矿作用

最近几年间，人们对铁的生物矿物的兴趣和认识有了惊人的增长，迄今已查明 11 种铁的生物矿物，它们分别属于铁的氧化物、含水氧化物、硫化物、碳酸盐和磷酸盐。

生物成矿作用可分两类，一类为生物诱导成矿作用（BIM）；另一类为生物控制成矿作用（BCM）。BIM 过程不受有机质控制，矿物颗粒大小变化范围很宽且不具单一的形貌；BCM 过程受有机质高度控制，矿物颗粒大小变化范围很窄。由铁细菌 *leptothrix* 和 *gallionella* 形成的铁的含水氧化物具有 BCM 作用的某些特点。磁铁矿既可以是 BIM 的，亦可以是 BCM 的，它们分别由异化铁还原细菌和磁序细菌形成，不过 BIM 型和 BCM 型磁铁矿的构造和磁性是不同的。由细菌形成的铁硫化物亦有 BIM 型和 BCM 型之分，它们分别由海相沉积物中硫酸盐细菌和高硫化物环境中的磁序细菌造成。

P. L. Binda 等对加拿大西部元古代 Siyeh 建造和奥陶纪 Winnipeg 建造中的硫化物包粒进行了研究，查明这些包粒含 9.17—26.10 $\mu\text{m/g}$ 的氨基酸。他们认为包粒的氨基酸如此丰富是细菌介入硫化物壳层沉淀的证据。

R. Raiswell 论述了软体动物化石中的黄铁矿化，他用一种扩散+沉淀模式解释黄铁矿的成因，并用分解的有机质与空隙水中溶解的铁的反应率来确定黄铁矿形成的轨迹。

2. 有机质与铀矿化

铀是研究和认识地圈内有机质与金属反应的关键因素。铀在氧化环境的酸到中性介质内以 U^{6+} 形式 (UO_2^{2+}) 活动，在还原环境内以 U^{4+} 形式沉淀。 UO_2^{2+} 与有机配合剂（如腐殖酸和褐腐酸）形成极为稳定的配合物。

B. Kribek 研究了世界著名的铀矿成矿省捷克波希米亚地块的沉积型和渗透型矿床，提出矿床中的铀是通过形成含铀有机化合物或作为单独的矿物相而聚积的，并认为这些矿床中沥青与矿石空间上密切共生是热液体系有机分子的辐射诱发聚合作用的结果。

世界著名的铀矿地质研究中心法国南锡的 CREGU 的青年科学家 P. Lan-

dias(1991),在铀矿床中发现了细菌使碳氢化合物降解的证据,并且指出细菌降解作用是铀还原反应的催化剂,因此有理由认为这种生物降解过程与铀矿化作用有关。他还研究了与各种矿床共生的沥青,他认为与铀矿床共生的被迁移过的有机质的地球化学研究能提供关于矿石成因、埋藏历史以及与成矿环境有关的水循环类型方面的信息。他还指出沥青可在储集岩中造成一个还原环境并参与铀矿物沉淀作用。

3. 有机质与金矿化

在土壤及泥炭沼泽的腐殖质及藻席中常可见到金的富集。金与有机炭的相关性,如金在富有机质沉积层的热液脉体围岩附近优先富集,有力地说明炭质对成矿热液中活化金的固定起了直接作用。生物膜对离子金 $[\text{Au}(\text{I})]$ 有很强的吸收能力,而且这种被吸收的金又可迅速而容易地被有机化合物还原,这通常被认为是金沉积的重要机制。

Gatellier 和 Disnar 在 20—200℃ 温度条件下对水溶液中 $\text{Au}(\text{III})$ 被含煤物质还原的机理和动力学进行的实验研究证明, $\text{Au}(\text{III})$ 的配合物具有被成熟褐煤强烈还原的特点,该还原反应甚至在室温下也会使 $\text{Au}(\text{I})$ 从 $\text{Au}(\text{III})$ 的氯化物配合物中快速沉淀出来。

S. Lindblom 研究了美国内华达地区卡林型金矿床有机质与金沉积的关系。他用低温下的有机络合作用解释热液中金的可溶性,并指出银的存在会降低金的有机络合。

帅德权(1990)对河南桐柏金银矿床物质组分详细研究后认为,该矿床形成与有机炭质物的吸附、还原、沉淀金属的作用密不可分,提出“天然炭吸附系统”成矿作用观点并与人工化学选冶黄金流程,即“人工炭吸附系统”的聚合作用相类比。

萃取冶金学家 Davidson(1990)强调活性炭在著名的南非砾岩型金矿形成中可能起重要作用,因为活性炭能强烈吸附溶解度较低的 Au 、 Ag 和 Cu 的一价二氰络合物,即 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 、 $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ 和 $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$ 。他还对当前流行的该类矿床的砂矿成因模式提出异议,指出热液模式只考虑埋藏后的效应是一大缺点,并首次提出对埋藏前效应加以充分考虑的埋藏前吸附成因模式。

王恩德和关广岳(1991)在“微生物”对 Au 、 Ag 、 Fe 、 S 、 As 的反应机理研究取得了可喜的成果。他们用直接从酸性矿坑水中分离、培养出的细菌对含 Au 黄铁矿和含 Au 毒砂进行氧化溶解和 Au 活化迁移实验。实验表明,在细菌参与下形成的硫酸金络合物是金在表生成矿过程中最重要的迁移形式。

4. 有机质与铅锌矿化

以碳酸盐为主岩的密西西比河谷型(MVT)矿床的成因虽较复杂,但是它们

大多与有机质有关,这已是广大矿床学家和地球化学家的共识。著名实验地球化学家 Barnes 教授及其同事(1991)在一篇新作中指出,密西西比河谷上游两个矿区的详细研究表明,矿化作用引起了局部的碳氢化合物异常,富铅矿床比富锌矿床更富含有机质。他们还指出,年龄最大的(20 000Ma 左右)MVT 矿床(南非)与藻源沥青共生。他们认为 MVT 矿床淀积于盆地主生油期之前,即恰好是盆地油页岩失去官能团的热成熟阶段;油田热卤水是 MVT 矿床的成矿溶液,有机络合物是搬运足够金属的唯一手段;MVT 矿床淀积时正处于热带环境;硫和氧的有机化合物是 MVT 矿床二价金属矿物组合形成的原因。

曼彻斯特大学的科学家 Baines 等人近年研究了北海油田中铅锌铁硫化物矿化与碳氢化合物运移的关系。他们发现储油砂岩中的铅锌铁硫化物矿化特征与 MVT 矿床相似,所有矿化都集中于碳氢化合物储集层的石油带内。流体包裹体研究表明,成矿流体为中到高盐度的复杂卤水,成矿温度下限为 70—120℃。

5. 黑色页(泥)岩中的有机质与金属矿化

含金属黑色页岩,长期以来一直是矿床学家和地球化学家的重要研究对象。起初人们看中的主要是其中的贱金属(Cu、Pb、Zn),后来又注意到其中的 Ni、Mo、V、U,最近几年又发现了其中的 Au 和 Pt 族矿化,因此含金属黑色页岩的身价越来越高。

Sowlowicz 认为有机质是波兰含铜页岩矿床形成和转变的基本营力之一,某些金属(U、Ni、贵金属)在有机质中呈有机金属化合物形式存在,有机质参与了金属聚集、保存和硫化物的再分配。Zentilli 等探讨了碳氢化合物的来源、活化作用、迁移、圈闭和保存及其与成矿作用的关系等问题。

Garvshin 对比研究了从寒武纪到渐新世各个地质时代的黑色页岩与黑海腐泥的化学成分,认为有一种元素组合,即“亲有机质”(organophile)元素组合是与有机质一起从海水中被化学搬运到沉积物中的,并指出“亲有机质”元素从海水中被选择性地萃取在全球地球化学平衡中具有重大意义。西德科学家前不久完成了名为“联邦德国富有机炭泥质沉积岩”的地球化学数据库,大量数据表明黑色页岩中可采金属含量主要是由多阶段(包括同生沉积、早期成岩、晚期成岩到低级变质和表生富集)作用造成的,矿床产出与氧化还原前沿(redox fronts)有关。

三、热点之三:现代洋(海)底成矿作用

洋底现代热液硫化物矿床的发现被认为是现代地质学最重大和具有突破性意义的成就之一。1986 年和多伦多大学海洋地质研究实验室主任 S. D. Scott

(1991)教授在瑞士伯尔尼大学举办的《现代与古代块状硫化物矿床》讲座中,总结 and 阐述了现代洋底多金属块状硫化物矿床研究的现状和主要成果,并指出海底采矿的前景。

现在已知世界上有 104 个这类矿产地,其中太平洋 100 个,大西洋 2 个,地中海 1 个,红海 1 个。这些矿床按其主岩可分为两类,即火山岩为主岩海底硫化物矿床(例如 TAG、胡安德富卡海岭南部、探险者海岭等)和沉积岩为主岩海底硫化物矿床(例如中谷、埃斯卡纳巴海槽、亚特兰蒂斯 I 号深渊等)。

热液丘(hydrothermal mound)是洋底火山活动的重要景观,也是块状硫化物矿床的主要产出形式。较具代表性者发育于大西洋中脊的 TAG 热液矿田,东太平洋胡安德富卡海岭北部の中谷硫化物矿床等地。

黑烟囱向海水喷黑色烟尘,主要由磁铁矿和富铁闪锌矿组成,属高温($350^{\circ}\text{C} \pm$)产物;白烟囱向海水喷乳白色烟尘,主要由非品质二氧化硅、重晶石和黄铁矿组成,属中低温产物。

TAG 矿田有一个活热液丘,其直径为 250m,高 40m,具同心圆式分带,即:(a)中心带为由黄铜矿和硬石膏组成的黑烟囱,直径 40—50m,高 10—20m,排放高达 360°C 的富含金属的溶液;(b)滨中心带为由闪锌矿和黄铁矿组成的白烟囱,排放金属亏损的 300°C 的冷导(conductivity-cooled)溶液;(c)边缘带为硫化物锥,具含 Au 次生富集的氧化壳;(d)外裙带,由硫化锥、玄武岩锥、羽状崩落物和混有碳酸盐软泥的富铁硅质赭石构成。

据统计,世界上古代块状硫化物矿床金的总产量和保有储量之和已达 2900 吨。那么,现代洋底块状硫化物矿床含金情况又如何呢?从已获得的不很完全的资料看,情况是相当令人鼓舞的,例如著名的 TAG 矿田金的平均含量为 2.1×10^{-6} ,而其中的白烟囱金含量竟达 4.9×10^{-6} ;冲绳海槽 5 个样品的金的平均含量为 5.1×10^{-6} ,轴向海山 14 个样品的平均值为 4.9×10^{-6} 。根据 Tufar(1992)的最新报道,在巴布亚新几内亚俾斯麦海的 Manus 弧后盆地的黑烟囱中采到含金量达 1.3×10^{-6} — 52.5×10^{-6} 的样品。金的富集一般在矿化作用的晚期阶段,即赋存于在 300°C 以下形成的黄铁矿的矿物组合中。 Zn-Fe-Ba-SiO_2 沉淀物含金最高。金在闪锌矿、黄铁矿或白铁矿中呈次显微包裹体形式产出。有时金的富集与低温组合的硫盐矿物共生。现代洋底富金沉淀物通常含 Ag、Sb、Hg、Tl 和 Pb 较高,例如轴向海山、探险者海岭南部、TAG 热液矿田和 Snakepit 喷流口,局部含 Au 大于 1×10^{-6} 的样品可含 280×10^{-6} — 1100×10^{-6} Ag, 270×10^{-6} — 1400×10^{-6} As, 70×10^{-6} — 660×10^{-6} Sb, 9×10^{-6} — 45×10^{-6} Hg, 39×10^{-6} — 160×10^{-6} Tl 和 1300×10^{-6} — 9700×10^{-6} Pb。

现在对洋底块状硫化物矿床的研究还不仅限于直接观察、填图和对矿石沉

积物进行取样分析,而且有的科学家对烟囱的生长过程和沉积物孔隙流体进行了较为深入的研究。美国任兹霍尔海洋研究所的 M. K. Tivey 对胡安富德卡海岭烟囱的生长进行了定量模拟。他模拟了烟囱生长时的物质搬运进程和化学反应进程,从而精确地再现了东太平洋隆起北纬 21° 的喷流口黑烟囱壁的演化。加拿大地质调查所 J. W. Lydon 等在对胡安德富卡海岭中谷勘查时,在热液活动和硫化物沉积区取了 21 个活塞式和重锤岩心,从中系统地抽取孔隙流体进行研究。他们将孔隙流体分为正常型、溢流热液型和改造型三个化学类型,并认为热液流不仅在表面沿着有强喷溢口的通道集中,而且也在地下热液柱周围的沉积堆积中普遍扩散。

审稿 戴自希

主要参考文献

- [1] 帅德权, 1990, 桐柏金银矿床物质组分特征和有机发质物——石墨及成矿意义探讨, 河南地质, 第 8 卷, 第 1 期, 1—9 页。
- [2] 中国矿物岩石地球化学学会, 1991, 全国第四届矿物岩石地球化学讨论会论文摘要汇编, 地震出版社。
- [3] Brantly, S. L., 1992, Kinetics of dissolution and precipitation—Experimental and field results, In: Kharaka & Maest (eds.) Water-Rock Interaction (WRI-7), Balkema, Rotterdam, p. 3—6.
- [4] Davidson, R. J., 1990, A pre-burial adsorption model for the genesis of gold in Witwatersrand, 1. South African Institute of Mining and Metallurgy, No. 3, p. 53—57.
- [5] Disnar, J. R. & Surcou, J. F., 1990, Organic matter in ore genesis: Progress and perspective, Organic Geochemistry, Vol. 16, No. 1—3, p. 577—599.
- [6] Frankel, R. B. & Blakemore, R. P., 1991, Iron Biominerals, Plenum Press, New York, p. 435.
- [7] Gize, A. P., Barnes, H. L. and Bell, J. S., 1991, A critical evaluation of organic processes in Mississippi Valley-Type genesis, In: Pagel & Leroy (eds.) Source, Transport and Deposition of Metals, Balkema, Rotterdam, p. 527—530.
- [8] Hannington, M. D., Herzig, P. M. and Scott, S. D., 1990, Auriferous hydrothermal precipitates on the modern seafloor, In: R. P. Foster (ed.) Gold Metallurgy and Exploration, Blackie, p. 249—282.
- [9] Hochella, M. F., 1992, The changing face of mineral-fluid interface chemistry, In: Kharaka & Maest (eds.) Water-Rock Interaction (WRI-7), Balkema, Rotterdam, p. 7—12.
- [10] Landais, P., 1991, Analysis of bitumens associated with uranium ores, In: Pagel & Leroy (eds.) Source, Transport and Deposition of Metals, Balkema, Rotterdam, p.

549—552.

- [11] Miles, D. L. (ed.), 1989, Water-Rock Interaction WRI-6, Balkema, Rotterdam, p. 819.
- [12] Mountain, B. W. & Williams-Jones, A. E. , 1991, Experimental simulations of water-rock interaction, In: Pagel & Leroy (eds.) Source, Transport and Deposition of Metals, Balkema, Rotterdam, p. 95—98.
- [13] O'Neil, J. R. , 1992, Stable isotope exchange in fluid mineral system: Old problems, new solutions. In: Kharaka & Maest (eds.) Water-Rock Interaction (WRI-7), Balkema, Rotterdam, p. 861—864.
- [14] Pagel, M. & Leroy, J. L. (eds.), 1991, Source, Transport and Deposition of Metals, Balkema, Rotterdam, p. 841.
- [15] Rickard, D. , 1991, Reaction kinetics in ore formation, In: Pagel & Leroy (eds.) Source, Transport and Deposition of Metals, Balkema, Rotterdam, p. 3—6.
- [16] Scott, S. D. , 1991, A Short Course on Massive Sulfide Deposits: Modern and Ancient, March 7—11, Universitat Bern.
- [17] Tufar, W. , 1992, Modern hydrothermal complex massive sulfide formation ("Black Smokers") in the Manus Back-Arc basin (Bismark Sea).

现代活动热液成矿体系研究 进展及其意义

刘建明

(成都理工学院)

摘要 热液矿床领域,主要通过研究其古代产物——热液矿床来反推成矿的过程和条件,但有其不确定性和多解性。70年代以来,特别是近年,对现代大陆和洋底活动热液成矿体系的直接观察和系统研究,取得了许多突破性的进展,深化了对热液成矿过程的认识。深部岩浆上升在浅部地壳内形成许多地热异常场,大陆地热异常场的热水活动主要生成地表热泉型矿床和浅成热液型矿床及其底部的斑岩型矿床;海底地热异常场内,在海底形成热液喷流成矿区。喷流热液或者遵循烟囱-圆丘模式生成近源透镜状矿体,或者通过海底热固水池生成远源席状矿体,或者在喷口以下生成更具后生特征的脉状矿化,正如地史上的块状硫化物矿床和其他海底喷流型矿床所显示的那样。

主题词 热液成矿作用 海底热液成矿系统 成矿控制

将今论古的现实主义原理,为认识漫长地史中发生的地质事件提供了可行的思维方式。但热液成矿作用领域却由于技术条件的限制,一直未能对现代地球上活动着的热液成矿体系做系统全面的观察研究,仅靠研究其古代产物——热液矿床来反推成矿的过程和条件。这种反演推理的不确定性和多解性,一直是阻碍成矿理论发展的关键所在。直到70年代后期,随着各种科学技术手段的高度发展,才开始了对大陆和洋底活动热液成矿体系直接观察和系统研究的新阶段。近年又与地史上的相关矿床进行广泛对比研究,短短十几年爆炸性地积累了大量资料,取得了许多突破性的进展,大大深化了人们对热液成矿过程的认识,引起了广泛关注。正如许多专家所说,其理论和实践意义怎样强调都不过分。

成矿热液,目前被广义地理解为具有一定温度、能造成有用组分富集的任何成因水热流体。不均匀性是地壳的基本特征之一。深部炽热岩浆的上升使地壳温度分布不均匀,形成许多地热异常区。一般认为浅部地壳内有一个不连续的地下水圈,在热力驱动下就会产生水热流体的环(对)流,这种热水活动就是地热异常区的主要表现形式,也是本文讨论的主要对象。地热系统多与火山岩—

起集中分布在板块离散(海底环境)或聚敛(大陆环境为主)边界,因此,现代热液成矿体系通常被分为大陆和海底两大类。

一、大陆现代热液成矿体系及其有关矿床

70年代世界性的能源危机使人们加强了对地热能的开发利用,从而对大陆地壳浅部的热水体系积累了丰富的资料。

现代大陆地热系统在地表有热泉、喷泉、喷气孔、热淤泥池、泉华、热液蚀变等表现形式。尽管其能量主要来自上侵岩浆,但稳定同位素研究表明,绝大多数热水源于当地大气降水,其中的溶解组分则主要由环流热水从流经的岩石淋滤而来;当然,在较深部位岩浆热液的活动会越来越强。热水的物理化学特性变化很大,据大量资料综合得知以下几点初步认识:①多为低温($50-250^{\circ}\text{C}$,个别可达 400°C)、低盐度($0.1\%-2\%$)的氯化物型热水。从深部向浅部,热水的温度和矿化度降低,但 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 的浓度在浅部反而增高,前者是浅部氧化的结果,后者则是沸腾分出的 CO_2 上升造成的。②热水及其沉淀物均含有一定的成矿组分,但通常认为较活泼的铜、铅、锌等贱金属元素浓度很低,惰性的金和银反而高,具较深部铅锌而较浅部金银的矿化分带性。③流体中气体的含量和成分变化更大(从热泉水到喷气),气相以水蒸汽为主,次为 CO_2 ($0.35\%-\leq 30\%$)及少量 H_2S 、 CO 、 CH_4 、 H_2 、 NH_3 和微量惰性气体。

热水与围岩发生化学反应和组分交换,从而留下各种围岩蚀变供人们观察。常见有硅化、青盘岩化、泥化、前进泥化、沸石化、绢云母化、冰长石化、叶蜡石化、明矾石化、碳酸盐化等。在化学成分上大都表现为硅、钾的带入和钠、钙的带出。蚀变矿物有三种产出方式:交代原岩、充填微细裂隙和空隙、地表泉华。蚀变使围岩渗透率降低往往造成“自封闭”现象,结果使热液系统的内压力不断积累升高。前进泥化(advanced argillic alteration)与泥化相似但又有区别,其标型矿物组合除泥化中的高岭石、蒙脱石、伊利石等粘土矿物外,还有明矾石、叶蜡石及富铝粘土矿物,是酸性氧化溶液淋滤的产物。通常是热液在地表附近遭到氧化后再下渗淋滤酸一中酸性火山岩而成,曾被称为“酸性热泉蚀变”和“硫质喷泉型蚀变”。

热液卸载机制很多,如上升热水与浅部较冷水相遇混合、围岩蚀变、减压过程等。但目前最受重视的热液卸载机制乃是热液沸腾。沸腾是一个物理化学参数急剧变化的绝热膨胀相变过程,结果是 CO_2 、 H_2S 、 CH_4 等气体组分在液相中的活度降低,流体pH值和矿化度升高,温度则由于相变能和膨胀力的释放而降低。许多地热电厂就是利用上升热水沸腾产生大量蒸汽来推动涡轮运转发电的。当外压骤降、热液急剧沸腾膨胀时,常发生所谓的水热(热液)爆炸(phreatic

or hydrothermal explosion)形成各种热液爆炸物(角砾、细屑等),表现为热液隐爆角砾岩、地表泥火山等,同时产生热液爆破裂隙或使原有裂隙再次活动。

什么情况下会发生热液沸腾呢?①热液快速上升,外压降低的速度大于热液蒸汽压降低的速度;②热液突然进入扩容减压带;③热液沉淀或蚀变造成的自封闭使内压升高,结果往往周期性地地在一些薄弱部位发生热液爆炸;④水渗透到岩浆侵入体(包括次火山岩体)附近被骤然加热。

据此,空间上从深部到浅部,流体的沸腾和混合可分出三个带:①下部沸腾混合沉淀带位于岩浆侵入体系边部及其附近,此外发生上升岩浆水和下渗对流水的沸腾和混合;②中部沸腾混合沉淀带是热水对流系统的主体,沸腾发生在各种扩容减压带,同时伴有巴尔苏科夫的“自混合作用”;③地表热泉带的沸腾表现为各种喷气孔,并发生热水与冷地下水或地表水的混合。

笔者(1989)曾通过广泛的综合对比指出,上述三个沸腾混合沉淀带分别对应于地质历史上的斑岩型矿床、浅成热液矿床和热泉型矿床。这意味着,斑岩型矿床是深部上升岩浆热液与地壳浅部对流热水成矿体系接合部位的产物,其下则应出现典型的岩浆热液矿床。现有资料表明,主要是矽卡岩型矿床以及石英脉型和云英岩型锡钨矿床。综合起来,由于中—酸性岩浆侵入大陆地壳造成的地热场内可能出现上下两个热液成矿体系,即深部的上升岩浆热液和浅部的环流热水成矿体系,从地表向下可能出现如下的矿化分带:地表热泉型金、汞矿床→浅成热液金银矿床以及铅锌(银)矿床→斑岩型铜钼矿床→矽卡岩型铜、铅、锌矿床以及钨、锡矿床→石英脉型和云英岩型钨、锡矿床。这一综合热液成矿序列模式对于分析环太平洋成矿带有关热液金属矿床的成矿规律具有相当的意义。当然,由于具体的地质、地球化学条件不同会发生某些带的缺失或位置变化。对上述五类矿床成矿时代、温度、深度和盐度的系统对比表明,从热泉型矿床到云英岩型矿床,其成矿时代越来越老;相应地,其成矿深度、温度和盐度也依次增大,显示成矿越来越接近热源——岩浆侵入体。应该说明的是,这五类矿床的年代顺序实际上是它们成矿深度序列(也就是遭受风化剥蚀序列)的反映。有趣的是,产在高盐度岩浆热液和低盐度循环热水结合部位的斑岩型矿床,其成矿流体可明显分出高盐度和低盐度两部分。

二、现代海底热液喷流成矿体系

70年代以来潜海探查和深海钻探成果举世瞩目。海底热液成矿系统的发现和研究,就是其重要的成果之一。大量的地球物理测量表明,具高热流量的洋脊,其内部热流量分布极不均匀。地球物理学家指出,这是下渗冷海水的热对流循环造成的,这种热对流体系在地质历史上普遍存在,是地球冷却的重要机制,

其海底露头将构成一个热水喷流区。采自洋脊的玄武岩样品都显示一定程度的蚀变变质(低绿片岩相为主),经研究,这是海水热对流过程中与玄武岩反应的结果,控制海底热液物理-化学特征的主要因素有三个:与海水反应的岩石特征(主要是玄武岩,但也可能是超基性岩、沉积岩等)、反应时的温度以及水岩比。以温度 400℃ 和水/岩比 50% 为界,通常分出四类反应:①低温-高水岩比,主要发生于洋壳上部玄武岩层表层数米处;②低温-低水/岩比,发生于洋脊深部;③中(高)温-中(高)水/岩比,扩张中心侧翼;④高温-低水/岩比,主要发生于扩张中心轴线上。只有第四类反应最有利岩石中铜、锌、铁、锰等金属的活化淋滤。不同的水/岩比和温度条件下海水热液的 pH 值演化显著不同。海水热液中金属组分主要以氯络合物形式存在,因此海水淋滤运移金属的能力与 pH 值息息相关,酸性条件有利金属的活化迁移。总的看来,海底热液的物理化学特征变化很大,据现有实测数据,温度在 44—400℃ 范围,盐度为 2%—46.7% 之间。

目前,研究最多的是上升环流热液在海底上下卸载的过程。卸载既可发生在海底以下的岩石裂隙孔隙之中,也可在海底与正常沉积作用一起进行。热液卸载的机制主要有沸腾、与冷海水以及围岩相互作用(包括温度、氧逸度、酸碱度以及各种矿化剂和金属组分的交换)。而影响卸载过程的主要因素有热液的物理化学特性、海水深度和海底地形等。因而,就有可能出现以下三种端元情形:

(1)高温低盐的低密度流体上升到岩石裂隙发育的浅海水区,由于海水柱压力远小于热液的饱和蒸汽压,热液将在上升途中通过多次减压沸腾以及浅部下渗冷海水和围岩的反应而在海底以下生成具后生热液矿化特征的脉状矿体。最后到达海底的是已基本卸载完毕的混合流体。

(2)低温高盐的低密流体(密度大于冷海水)注入海底后,沿海底地形流至低洼处形成热卤水池。此时热液中的金属散失较少,将达到最大程度的富集。多生成远源的板状或席状矿体。正如现代红海海渊热卤水池所显示的那样,热卤水自身也呈现分层现象,卤水池中金属矿物的堆积过程更符合沉积叠加定律,卤水的间歇式排泄则形成矿石细小而明显的条带构造和不同矿物的互层。卤水池的形成不仅防止了喷流颗粒被驱散,而且也使矿化沉淀物免受正常海水的氧化。

(3)密度小于海水的高温流体在海底将形成浮升喷流。热液中的大部分金属将在浮升喷流中散失,并加入邻近海域的沉积物中生成大面积的初步富金属沉积层。部分金属则遵循一种所谓的“烟囱-圆丘堆积模式”就地聚集成近源透镜状矿体。刚出喷口的热液大多清澈透明,但往上则由于各种细粒沉淀物的出现而成为冒烟的“烟囱”,以黑色金属硫化物沉淀物为主者称为“黑烟囱”,而以白

色硫酸盐和 SiO_2 为主则为“白烟囱”。烟囱的生长是在热液与海水的交接带上从硬石膏的沉淀开始的,这是由于硬石膏的溶解度随温度的升高反而下降。环绕喷口的硬石膏壁孔隙发育。由于流体的高温特性和高速流动,壁内压力低于壁外,于是壁外海水回渗与热液在孔隙中相遇;由于壁内外物化条件的剧变(壁内高温、酸性、还原、 $\text{HS}^- \gg \text{SO}_4^{2-}$;壁外低温、中—碱性、氧化、 $\text{HS}^- \ll \text{SO}_4^{2-}$),使热液中的溶解组分沉淀在硬石膏壁孔隙中。随着热液的不断涌出,这一海域的温度持续升高,硬石膏的生长带也将不断向外、向上移动,致使烟囱不断长高加粗。长到一定高度后终将坍塌,形成由烟囱塌积物构成的圆丘,丘上又开始新烟囱的生长。如此反复多次,圆丘将完全盖住热液喷口,于是开始了以圆丘为单位的热液沉淀过程。其机制与烟囱生长基本一致,只是由多空的水热喷发角砾岩和塌积物代替了多孔的硬石膏壁,原来集中的热液流在碎屑丘内散开,发生平流、对流、绝热膨胀或传导冷却,并形成硅-钙质低渗透率外壳,热液则通过数目众多的细小蠕状喷气孔(直径 0.5—30mm)分散排放。圆丘生长到一定程度,由于水力压裂或构造地震活动又将产生新的集中通道,于是又有新烟囱的生长。如此烟囱-圆丘反复进行,通过孔(裂)隙充填、面壳生长、烟囱塌积以及喷流颗粒的回落加积使圆丘不断长大成镜状矿体。

以上三种端元情形可能同时出现在同一喷流区,但各自的发育程度不一。总起来看,以热液喷口为中心将出现一个物理化学参数的梯度场(温度、酸度、氧化度、组分活度等),从而造成一定的矿物相分带。分带的规模大小不一,可能是在单个蠕状通道或烟囱内,也可能象红海热卤水池那样达到数公里范围。当然,在热液活动过程中这一梯度场的大小、强度以及空间位置都在不断变化,结果造成不同相带之间的叠置。值得注意的是,喷流区的海流情况和外部沉积物的加入情况对热液沉淀物的富集程度、空间分布以及保存等方面都有大的影响。在一些现代沉积物覆盖区(海底未直接出露火山岩),也发现有热液活动,如美国的 Salton Sea、加利福尼亚湾的 Guaymas 盆地、北东太平洋 Gorda 海脊的 Escanaba 海槽和 Juan De Fuca 海脊的 Middle Valley 等。这种热液则复杂得多,并非单纯由海水/玄武岩反应而成。据同位素研究,Salton Sea 的热卤水主要源自当地大气降水,热液中的金属组分也与尚在成岩演化中的盆地沉积物有关。据 Lettunay 等(1988)和 Koski 等(1988)的研究,Escanaba 海槽热液的铅同位素与附近深海钻孔中浊积岩的铅完全一致,根本没有玄武岩铅的迹象。结合热液沉淀物的矿物学、地球化学特征以及高的石油含量,他们认为,该海底热液是与当地沉积物(岩)相互作用而成的。石油地质学界对油气生成和初次运移以及对油田卤水的研究业已表明,在沉积盆地演化过程中,沉积物成岩压实和矿物相变都能释放出大量的水,并由于离子过滤效应、有机物变质作用、地热增温、相