

热液矿床——不同构造背景 的古地热系统*

华仁民

(南京大学地球科学系, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京)

提 要: 热液矿床与地热系统之间的联系一直为矿床工作者所关注。最近几十年的研究已有有力地证明: 所有的热液矿床都是地热系统的产物, 因此可以把热液矿床看作一定构造背景中的古地热系统。本文通过实例说明二者之间的内在联系, 并指出: 运用研究现代地热系统的思路和方法来研究热液矿床, 有可能开拓矿床学研究的新局面。

关键词 热液矿床 地热系统 地质构造背景 麦克劳林 陶波

热液矿床 (hydrothermal ore deposit) 与地热系统 (geothermal system) 之间的联系, 一直是矿床工作者所关心探究的课题之一。早在 50 年代, D White 就认为许多浅成热液 (epithermal) 矿床的成矿流体与现代地热流体具有相同或类似的性质, 因而可以把这类矿床看作是由过去的 (fossil) 地热系统所形成的^[13,14]。近 20 多年来, 对发生在环太平洋地带等活动地热区以及海底热液喷发中心的现代金属成矿作用的观察与研究取得了许多重大进展^[3,4], 并导致了人们对热液矿床形成机制的许多新认识, 也使人们更加重视地热系统与金属成矿作用之间的内在联系^[5]。纵观全球, 从绵延万里的西南太平洋岛弧带 (日本-台湾-菲律宾-印尼-巴布亚新几内亚-斐济-新西兰) 到美国西海岸, 从红海的深海渊到东太平洋中隆, 从堪察加半岛到冰岛, 从黄石公园到云南腾冲, 海底或陆地上喷涌的蒸汽和热水都是正在进行中的热液活动, 并且在不同程度上伴随着热液成矿作用。因此, 我们今天可以毫不犹豫地说: 所有的热液矿床都是地热系统的产物, 尽管不一定所有的地热系统都能形成有工业意义的热液矿床。换言之, 现今存在的热液矿床在地质史中的某一时期都曾经是活动的地热系统。目前许多文献中把现代活动的地热系统也称为活动热液系统 (active hydrothermal system), 这是非常恰当的。

1 现代地热与金属成矿作用的两个实例

有关现代活动地热系统成矿的实例已有不少文献报导, 这里仅举笔者实地考察过的两个典型例子。这两个实例的意义还在于: 活动地热的成矿作用与古地热形成的工业矿床共存于同一地质构造环境, 从而提供了研究地热成矿的最佳场所。

1.1 美国加利福尼亚州 Geysers-Clear Lake 地热区

该地热区位于加州境内海岸山北段。Geysers 是一个以高热蒸汽为主的地热田, 建有目前世界上最大的地热发电站; 而 Clear Lake 是一个年轻的 ($2 \times 10^6 \sim 0.01 \times 10^6$ a) 火山活动区, 分布众多的热泉和温泉, 其中有些热泉如 Wilbur Springs 正在形成富金的沉淀物, 其黑色沉淀物含 $\text{Au} > 4 \text{ g/t}$ ^[6,7]。

在该地热区的东南角有著名的麦克劳林 (McLaughlin) 金矿。该金矿在构造上位于活动的海岸山逆冲断层带, 该断层属圣安德列斯断层的北延部分, 下盘为弗朗西斯科混杂堆积, 上盘为 Great Valley 前弧盆地沉积。由于频繁的断裂活动而导致岩石的反复破碎, 加之由多期次沸腾造成的水热爆破碎裂结构, 使矿

* 国家自然科学基金资助项目 (49733120)

华仁民, 52 岁, 教授, 矿床学专业。邮政编码: 210093

区岩石具有高渗透性,有利于流体运移。麦克劳林较富的金矿体由石英和玉髓脉组成,由于多次反复的破裂-愈合-再破裂-再愈合而构成复杂的网脉状矿体。金矿化局限在浅部近地表,一般在300 m之内尖灭,成矿温度也较低,为150℃。据研究,麦克劳林金矿的成矿流体是沉积物中海相原生水的演化产物^[8],表明可能是盆地流体参与成矿^[6,7],金矿石中含有液相石油这一特殊现象可能也是富烃盆地水(类似油田卤水)的证据之一。而这些特征也正和该矿床周围的那些地热流体(热泉)的性质类似,即中等盐度、富硫、富烃、还原、中性pH等。所以,今日的Wilbur Springs等地热流体相当于当年麦克劳林金矿的成矿热液这一结论已经被研究者所普遍接受。

1.2 新西兰陶波(Taupo)地热区

新西兰北岛中部的陶波火山带是一个典型的火山构造拗陷,是与板块俯冲有关的弧后拉张带,火山、地震和地热活动非常发育。据统计,在陶波火山带共有约20个活动的热液(地热)系统,热液流体的组分有氯化物型、重碳酸型和酸性硫酸盐型三个端元,其物质成分的来源则包括三个部分:热水主要来源于大气降水,C、S、Cl、F等挥发组分主要来自于岩浆的去气作用,而流体中的大部分溶解物(如Na, K, Si等)则来自于其流经的岩石^[9,10]。

对陶波现代活动地热系统与贵金属成矿作用关系的研究始于1937年,在70年代和80年代进入高潮。在Broadlands-Ohaaki, Waiotapu, Rotokawa等地热田的热水沉积物、蚀变岩石、钻孔水垢以及减压板水垢中都发现了达到或超过矿石级金银含量的实例^[3,11],其中如著名的香槟池(Champagne Pool)就是一个目前正在沉淀富金银沉积物的酸性硫酸盐型热液出口。

在陶波火山带的北西侧是由第三纪中新世-上新世安山-英安质火山活动产物构成的科罗曼德尔(Coromandel)火山带,该带发育有数十个浅成热液金银矿床,其中如Waihi矿床已生产了一百吨以上的黄金。这些矿床的蚀变、矿化以及成矿流体温度、盐度研究成果^[12]都表明它们形成时的地质构造环境与陶波火山带的现代活动地热系统是基本一致的。

2 地热系统及热液矿床的分类对比

2.1 分类原则

根据地质构造背景、热源、流体性质及水文地质条件的差异,通常把地热系统分为三种类型。第一类是与年青的浅成岩浆活动有关的高温地热系统,第二类是断裂带中的深循环水地热系统,第三类则是大型盆地的层状承压水系统,如果从全球构造的角度来看,则这几类地热系统基本上出于板块构造的不同部位:第一类地热系统的构造位置包括诸如①大洋中脊及海底火山;②俯冲带的火山岛弧或活动大陆边缘;③弧后扩张盆地和④大陆裂谷带等,本文所举的新西兰陶波火山带地热系统即属此类中的弧后扩张盆地。第二类地热系统产在陆壳内的板块碰撞-褶皱造山带,由于地壳的抬升而导致沿主干断裂分布的高热流体,本文所举加州Geysers地热系统属此类。第三类则位于大陆板块内部的大型沉积盆地。

至于热液矿床的分类,过去都以温度为依据划分成高、中、低温,但是现代矿床学已逐渐废弃这种分类而更多地考虑矿床的形成机制及成矿地质构造环境。而从本质上来说,所有热液矿床的形成机制是大同小异的,都包含三个主要方面:①流体被加热并在岩石孔隙中运移;②流体通过水岩反应获得金属,从而演化为含矿热液;③金属从含矿热液中沉淀富集成矿。因此,成矿的地质构造环境应该作为热液矿床形成的首要控制因素来考虑,因而也是其分类的重要依据。

由上述可见,地热系统与热液矿床的分类也具有明显的一致性,即首先考虑地质构造背景,并结合流体性质、热源及水文地质条件等,唯热液矿床更重视矿质在其中的源、运、聚过程而已。

2.2 重要热液矿床类型及其相应的地热环境

根据国内外文献的综合,可以列出以下8类具有全球意义的重要热液矿床类型:

(1) 块状硫化物和喷流沉积矿床。

- (2) 斑岩型铜(钼、金)矿床。
- (3) 夕卡岩型矿床。
- (4) 次火山热液型铜金铅锌银矿床。
- (5) 与花岗岩有关的锡钨及稀有金属矿床。
- (6) 浅成热液贵金属矿床。
- (7) 变质岩系中的含金石英脉或韧性剪切带金矿床。
- (8) 沉积-改造型贱金属矿床。

只要简单考查一下上述这几类矿床的产出地质构造背景, 就不难得出它们与三大地热系统之间的关联。第1类矿床形成于洋壳的扩张中心(洋中脊、海底火山)或海洋环境的弧后拉张盆地, 它虽然已超出了一般意义上的地热系统研究范畴, 但因其实质上与海底火山活动中心有关, 所以仍可归属于第一类地热系统。第2~6类更是显然属于第一类与年青浅成岩浆活动有关的高温地热系统, 但由于它们各自所处的地质构造背景的差异而性质各异。其中第2、3、4、6类矿床主要位于活动的大陆边缘、岛弧及弧后盆地, 与安山-流纹质火山岩浆活动及相关的中浅成侵入活动有关; 而第5类及部分2、3、4类矿床则主要与陆壳板块内的A型俯冲或局部拉张作用有关, 其岩浆活动的深度稍大。第7类矿床主要是第二类地热系统的产物; 而第8类矿床显然主要与第三类地热系统有成因联系, 即由于大陆裂谷或拗拉谷作用造成的盆地快速沉降和沉积作用, 使承压的地层水(Connate water)加热和运移, 形成一系列有关的矿床, 其中较典型的有美国的密西西比河谷型贱金属矿床(MVT)、砂岩铀矿、红层铜矿以及许多沉积-改造型矿床, 如东川式层状铜矿等^[13]。

3 把热液矿床当作地热系统来研究

热液矿床是古地热系统的产物, 而上述 Geysers-Clear Lake 和陶波的例子表明古地热系统与现代活动地热系统的特征基本相同。涂光炽先生(1993)在为《中低温对流型地热系统》一书所作的序言中也指出: “开放体系成矿, 环流是重要机制, 而环流实际上就是……对流型地热系统”^[2], 所以, 采用研究地热系统的一些思路、理论和方法, 可能是研究热液矿床形成过程的新途径。

事实上, 地热系统的研究已经为热液矿床成矿作用研究提供了大量信息。许多关于浅成热液贵金属矿床的成矿模式的建立就得益于对西南太平洋岛弧带现代活动地热的研究成果。在所述新西兰陶波火山带, 20个左右的活动地热系统在空间上近乎等距离地有规律分布(间距10~20 km), 彼此以水的补给带(recharge zone)相隔; 在构造上或与主干断裂有关, 或与破火山口边界有关; 在剖面上最大钻孔控制深度已达2.7 km。研究还表明这些地热系统在时间上已经活动了至少1万年, 有些则已达30万年以上^[15]。这些时空数据为我们了解热液矿床的空间分布规律和形成时间范围(duration)提供了较清晰的图象。此外, 地热系统的蚀变矿物组合从低温的蛋白石、玉髓、高岭石、蒙皂石、沸石等, 到中等温度的石英、长石、伊利石、绿泥石等, 同样也是热液矿床的常见蚀变产物。

金属在流体中溶解、迁移并最后从流体中沉淀成矿的机制也在活动地热系统的研究中找到答案。对陶波地热带 Broad lands-Ohaaki 和香槟池等富金银沉淀物的研究清楚地显示: 减压沸腾是金银沉淀的重要机制, 这一点从地热管道终端减压板水垢高达4.5%~6.4%的金含量中得到了证明^[3]。而另一个重要的沉淀成矿机制则是非晶质 As_2S_3 和 Sb_2S_3 胶体对金、银的吸附作用, 在香槟池周边发育的富 As_2S_3 、 Sb_2S_3 桔黄色凝胶状沉淀物就是金和银的主要吸附剂^[16], 而实验研究表明在酸性条件下这些非晶质 As_2S_3 和 Sb_2S_3 能吸附溶液中100%的金^[17]。这或许也能解释为什么许多低温金矿床中金常常与砷、锑等元素共生的原因。

虽然包裹体、同位素、探针等日益发展的技术和测试手段为热液矿床研究提供了有效的途径, 但是因为矿床毕竟是在很久远的过去形成的, 所以总会给我们的研究带来困难。而如果用研究现代地热系统的思路和方法来看待热液矿床, 真正把热液矿床当作某种构造背景下的一个古地热系统来研究, 那一定会使传

统的矿床地球化学研究走出困境, 开创一个新的局面^[13,14]。

参 考 文 献

- 1 华仁民. 试论层状铜矿的三种主要成因模式. 地质论评, 1995, 41 (2), 112~120.
- 2 汪集旸, 熊亮萍, 庞忠和. 中低温对流型地热系统. 北京: 科学出版社, 1993.
- 3 Brown K L. Gold deposition from geothermal discharges in New Zealand, *Econ. Geol.*, 1986, 81, 979~983.
- 4 Degens E T, Ross D A. eds. Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea. Springer, New York, 1969, 541.
- 5 Giordano T H. Hydrothermal ore deposits and related geothermal systems. In: Kharaka & Chudaev eds. *Water Rock Interaction* 8, Balkema, Rotterdam, 1995, 13~16.
- 6 Peters E K. The aqueous geochemistry of the Clear Lake area, northern California, and its implications for hot spring gold deposits. Unpub. Pb. D. thesis, Harvard Univ., 1990, 237.
- 7 Peters E K. Gold-bearing hot spring systems of the northern Coast Ranges, California, *Econ. Geol.*, 1991, 85: 1519~1528.
- 8 Donnelly-Nolan J M. Thermal waters and mineralisation in the Geysers-Clear Lake area, California, USA, In: Kharaka & Maest eds. *Water Rock Interaction* 7, Balkema, Rotterdam, 1992, 1279~1282.
- 9 Hedenquist J W. Geothermal system in the Taupo Volcanic Zone: their characteristics and relation to alteration and mineralisation. *R. Soc. NZ Bull.*, 1986, 23: 134~168.
- 10 Henley R W, Hedenquist J W. eds. Guide to the active epithermal systems and precious metal deposits of New Zealand. *Monograph Series Mineral Deposits*, 1986, 26 (211).
- 11 Weissberg B G. Gold-silver ore-grade precipitates from New Zealand thermal waterw. *Econ. Geol.*, 1969, 64, 95~108.
- 12 Brathwaite R L, McKay D F. The geology and exploration of Martha Hill gold-silver deposit, Waihi. In: Kear ed. *Mineral Deposits of New Zealand*, Monograph 13, Austral. Inst. Mining Metal., Melbourne, 1989, 83~88.
- 13 White D E. Thermal springs and epithermal ore deposits. *Econ. Geol.* 50th Anniv, 1956, 99~154.
- 14 White D E. Active geothermal system and hydrothermal ore deposits. *Econ. Geol.* 75th Anniv, 1981, 392~423.
- 15 Browne P R L. Minimum age of the Kawerau geothermal field, North Island, New Zealand, *Jour. Volc. Geotherm. Res.*, 1979, 6: 213~215.
- 16 Hedenquist J W, Henley R W. Hydrothermal eruption in the Waiotapu geothermal system, New Zealand. *Econ. Geol.*, 1985, 80: 1640~1668.
- 17 Renders P J, Seward T M. The adsorption of thio gold (I) complexes by amorphous As_2S_3 and Sb_2S_3 at 25 and 90°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1989, 40: 379~399.