

# 地热系统的成岩成矿作用

朱梅湘

(北京大学地质学系,北京 100871)

**关键词** 对流型地热系统、泉华、水热喷发、地热活动、贵金属矿床

地热作为一种资源已被人们所熟知。但对与地热活动有关的成岩、成矿作用可能较为陌生。近几十年来发展起来的浅成低温热液矿床(尤指那些晚中生代和第三纪至近代火山活动所发生的大规模贵金属富集形成的矿床)的古地热活动成矿理论日益显示出它的重要经济意义,因此,有必要对地热系统成岩、成矿作用加深认识,以利发现更多的与古地热活动有关的矿床。

地热系统(本文仅涉及陆相对流地热系统)是指与地热活动有关的水热系统;是一个水热流动单位。其基本组成有:(1)能大量热输出的天然热源,(2)足够的补给水源,(3)渗透性(包括原生渗透性和次生渗透性)良好的热储岩体和(4)盖层(包括原始透水性差的岩层和自封闭造成的透水性降低的岩层)。氢氧同位素研究表明,补给水源绝大部分来自大气降水。它们下渗至地下深处被热源加热形成地热流体,再沿系统通道向上运移,在运移过程中,经历突变的物理化学环境(包括减压沸腾、pH、温度梯度、水力破碎、自封闭、水热喷发、与冷水混合、水-岩反应等变化)而发生地热系统所特有的成岩、成矿作用。其结果形成许多地热系统中独具特色的景观和产物。这些都是识别和判断是否存在或曾经发生过地热活动的有力证据。

直观认识某地是否存在水热活动是从地表热显示入手。热显示主要有:排水量很小的喷气孔、冒汽地面、汽泉,和经常排出大量热水的泉(温泉、热泉、沸泉、沸喷泉)和热水塘。此外,还有间歇喷泉、热水沼泽、沸泥塘、泥火山和水热爆炸。这些热显示常伴生下列各种产物。

泉华:为地热流体沿断裂通道上升至地表的直接沉淀物。按矿物组成主要有钙华、硅华、盐华和硫华。钙华多数由方解石组成,少数为文石。它的分布较广。泉华体形态多样,如泉华台地、泉华锥、泉华柱等。硅华由 $\text{SiO}_2$ 矿物(蛋白石、方英石、玉髓、石英)组成。蛋白石多沉淀于地表,随着时间的推移它可转变为玉髓。部分玉髓硅华也可能由流体直接沉淀而成。石英晶出温度高于 $180^\circ\text{C}$ ,故石英硅华应形成于地下,通常称硅帽,若产状陡立称石英脉体。“硅帽”也指地下围岩强硅化带加酸性淋滤带,即无论其原岩成分如何,经地热流体作用,原岩几乎全部被蚀变为 $\text{SiO}_2$ 矿物集合体。硅华常具非晶质、隐晶、微晶结构和条纹状、皮壳状、角砾状构造,晶洞、晶簇、干裂纹都特别发育。硅华体常呈泉华垣、泉华穹窿、泉华台地等。一般认为,硅华指示沉积时热储温度较高,钙华则指示低温。盐华分布零星,由盐类矿物(如天然碱、无水芒硝、毛矾石等)组成。硫华出现在高温区。

泉胶砂砾岩:流体流经孔隙度较大的碎屑岩石时,常在孔隙中沉淀出 $\text{SiO}_2$ 矿物,有时是碳酸盐矿物,将松散碎屑胶结起来,使原岩变得致密坚硬。我们赋予其成因概念“泉胶”。它们常具皮壳状结构、栉状结构。羊八井热水湖边第四纪泉胶砂砾岩过去曾被误认为是白垩纪地层。

水口山白垩纪底砾岩在书堂山形成大片泉胶砾岩。

**沸腾带产物:**地热流体向上运移至某一深度由于减压沸腾导致  $\text{CO}_2$  逸出, 流体变得更碱性 (pH 增大) 和骤然降温, 在沸腾带出现叶片状方解石、冰长石和石英这一特殊矿物组合。在古地热系统中叶片状方解石常被石英交代保留其假象。热泉型金矿床提供的证据表明, 沸腾是导致金沉淀的主要机制。因此, 沸腾带产物可以是热泉型金矿床重要的找矿标志之一。

**水热角砾岩:**为水热喷发产物。水热喷发大体可分浅源和深源两类<sup>[1]</sup>。浅源产物为水热喷发角砾岩, 它是水热喷发喷出的碎块形成的块状、分选性不佳、基质为高度粉末状的岩粉, 并朝向喷口逐渐增厚。常沿断裂带成群分布。深源产物是由水力破碎形成的, 称水压致裂角砾岩, 常呈产状很陡的脉状体。

水热角砾岩是热泉型金矿体重要的赋存岩石。在大多数水热系统中, 喷发中心赋存着地热系统中氯化物和挥发份含量最高和出流量最大的热泉; 是导管系统引起的流动汇聚之处, 也是金矿沉积的主要场所。

**水热蚀变:**化学性质活泼的高温地热流体在上升过程中与围岩相互反应, 使围岩发生水热蚀变。蚀变因素主要是温度、流体性质、断裂类型、岩石性质。因为是地热异常区, 温度梯度很大, 蚀变矿物 (尤其是粘土矿物、沸石类矿物和  $\text{SiO}_2$  矿物) 对温度反应非常灵敏。高温地热流体主要是富含  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  氧化成硫酸, 而使浅部成酸性环境。张性断裂在地热系统中起主导作用, 断裂决定岩石次生渗透性, 直接影响岩石的蚀变强度。地热系统水热蚀变特征具明显的分带性。随深度增加蚀变等级逐渐增高。从地表低级蚀变的高岭石、蒙脱石、片沸石、蛋白石组合, 富  $\text{SO}_4^{2-}$  地段有明矾石; 向下转变为中级蚀变的地开石、伊利石、蒙脱石混层矿物、发光沸石 ( $140^\circ\text{C}$ )、混沸石 ( $170^\circ\text{C}$ )、玉髓或微晶石英; 至主通道为高级蚀变: 伊利石 ( $210^\circ\text{C}$  以上)、斜钙沸石 ( $200^\circ\text{C}$  以上)、石英 ( $180^\circ\text{C}$  以上)、冰长石组合。如果原岩偏基性, 可出现绿帘石、绿泥石。有趣的是, 钻透主通道以后, 随深度增加蚀变等级转向, 由高级  $\rightarrow$  中级  $\rightarrow$  低级  $\rightarrow$  未蚀变岩石。这是地热系统蚀变分带一大特征。地表分带从近断裂酸性蚀变 (高岭石、明矾石) 到远断裂中性蚀变 (蒙脱石)。

**现代地热系统中的金属矿物沉淀:**一些地热区地热流体所含的锂、铯、硼等有时可达到矿石级。如内华达州汽艇泉口附近黑色硅质软泥含  $\text{Au} 10\sim 15\text{g/t}$ ,  $\text{Ag} 150\sim 400\text{g/t}$ ,  $\text{Hg} 45\text{g/t}$ , 并常见辉铋矿和辰砂。加利福尼亚硫磺滩卵石上有辰砂膜和大量自然硫。该处曾回收汞  $4.7 \times 10^6\text{kg}$ <sup>[2]</sup>。此外, 还发现金属元素分带性分布, 如新西兰布罗德兰兹地表桔红色絮状热泉沉淀物中含金、铋和汞, 而在钻孔深处则出现方铅矿、闪锌矿和黄铜矿<sup>[3]</sup>。土耳其伊利卡热泉塘内含辉铋矿的淤泥, 将其全部取走, 一年以后塘底又沉淀出含针状辉铋矿的淤泥。

我国高温地热区内也经常发现矿化现象。如西藏羊八井蚀变地面大量自然硫和少量辰砂、雄黄、雌黄。钻孔内浅部出现黄铁矿 (从地表至 70m 深处, 从球粒状经立方体转变为五角十二面体), 深部 (400m 以下) 出现黄铜矿<sup>[4]</sup>。又如云南腾冲热海热田, 从明代开始就采自然硫; 硅华中还含沥青铀矿、铀石和黄铁矿。

现代地热系统中的成矿现象对许多矿床成因具有将今论古的意义。目前对浅成低温热液矿床的成因认识正是在现代地热研究的启发下逐渐深化的。

与古地热活动有关的浅成低温热液矿床: 浅成低温热液矿定义为: 相当近地表的、在水热系统低—中压、低温环境下形成的矿床。其基本特征是: (1) 形成深度从地表至 1000m, 可沿走

向延伸很远；(2)形成温度为 50~320℃(一般 150~250℃)；(3)构造环境为发育良好的张性断裂系统和正断层的地区；(4)矿化以开放裂隙和孔洞充填为特征，近地表为浸染状或网脉状矿化，通常有多期角砾岩化；(5)其壳状条带、细梳状结构、胶状条带、晶簇洞穴、角砾状，石英呈板状方解石假象；(6)蚀变强烈，分带明显，硅化、粘土化、明矾石化、冰长石化、叶腊石化等；(7)以金、银为主要具经济意义的金属，它们与大量汞、砷、锑和少量硒、碲、铊共生。主要矿石矿物为自然金、自然银和银金矿，有时见辰砂和辉锑矿。此外，还常见闪锌矿、方铅矿和黄铜矿。

以上特征明显地与地热系统中成矿成岩作用产物相似。另外，现代高温地热系统主要分布在板块边缘地带。与大气降水有关的金、银、汞、锑、铅、锌、铜矿床也恰恰主要分布于环太平洋带陆相火山岩地区。而且许多矿床和现代地热区存在着密切的空间关系。如美国内华达州和新西兰北岛等地。因此，许多学者提出多数浅成低温热液矿床的形成与古地热活动有关，相继建立了一些浅成低温矿床的热泉型成矿模式。如美国麦克劳弗林矿开采了 100 年的汞矿，近年来发现为一典型热泉金矿床。该矿硅华中发现的丝状菌和藻类与汽艇泉泉水中生活着的丝状菌和藻类完全相同。此外，越来越多的过去曾被称作浅成低温热液矿床被确定为热泉型，或与古地热活动有关。最为典型的有美国朗德山、麦克劳弗林、卡林，新西兰戈登克拉斯，日本南萨和北萨，巴布亚—新几内亚 Wan 等矿床。我国近年来相继有人认为腾冲、水口山、紫金山、团结沟、五凤等矿床属热泉型或可能与古地热活动有关。

一些学者在许多矿床实例的基础上，对浅成低温热液矿床进行类型划分。如根据成分分为低硫型和高硫型，冰长石-绢云母型和明矾石-高岭石型；根据容矿岩石分为火山岩容矿型和沉积岩容矿型；根据矿体形状分为脉状、网脉状和浸染状；根据典型矿床分为卡林型、南萨型、菱刈型等。值得推荐的是 ML Siberman 和 BR Berger 综合浅成低温矿床特征和地热系统特征的分类<sup>[5]</sup>，将其划分为(1)热泉型或硅化石英网脉型(又分：a. 石英-冰长石或低硫型，典型矿床有朗德山、麦克劳弗林；b. 石英-明矾石或高硫型)；(2)富矿脉体型(闹堂式，又分低硫型和高硫型，如利德矿床)；(3)浸染交代型(典型矿床有卡林矿)。

热泉型矿床特征是：①形成于地表或近地表，形成深度为 300m 以浅；②具有硅华、水热喷发角砾岩和与之配套的蚀变围岩。尤其是有时本身是重要的矿石。a. 常具多期硅华，硅华本身含矿，硫化物矿物一般较少，硅化下面是多期硅化的围岩强硅化带；b. 喷发角砾岩(分为被胶结的和未被胶结的两大类)常呈平缓岩脉。这些岩脉一般向角砾岩化中心倾斜，角砾岩本身就是矿体。在低角度岩脉上盘常出现网状石英脉；c. 常具局部或较宽的粘土化带，主要蚀变组合为高岭石、明矾石、黄钾铁矾组合和石英、冰长石、伊利石组合。③矿化期间曾发生流体压力上升→水压致裂(角砾岩形成)→流体沸腾→绝热膨胀造成流体温度下降→热水中溶解组分沉淀(矿化作用发生在沸腾带下面)→系统自封闭→流体压力上升一系列反应活动。

富矿脉型矿床以高品位复杂硫化物脉与热泉型有明显区别。具体表现：①沉淀深度(350m 左右)大于热泉型；②脉的宽度大，可达数英尺，形成储量大、品位高的矿石；③硫化物含量高，矿物成分比较复杂，贱金属较多；④喷发角砾岩不象热泉型矿床中那样多。

浸染交代型矿床以储量大、品位低、交代型为特征。矿床规模比上二类型要大得多。其形成的基本因素是：①中等倾斜到陡倾斜的大型构造(一般为断层)，有利于地热流体侧向运动；②容矿岩石的渗透率低，因而热流体主要局限于上述构造中；③大气水可以相对自由地流入持续高热流区；④在该系统上部周期性地发生自封闭作用或渗透率有限的遮挡层，足以限制热流

体向上运动,又足以使它与处于较高位置的冷水发生有限的混合。所以在某一深度当温度为200~300℃时发生间歇性沸腾。

应该从地热系统活动特征来理解三类矿床的关系。实际上,地表热显示(包括泉华、水热喷发角砾岩)仅占整个地热系统的5%。水热蚀变的范围比泉华等分布范围要大许多。热泉型和富矿脉体基本上分布在热显示最强烈的地段。二者在纵向上构成漏斗状或筒状的上下关系。而卡林型在地下一定深度,可以在富矿脉体的外围或下部更大范围内形成。

近年来,有人将浅成低温矿床和较深成的中温矿床作为一个完整的体系。后者多指与岩浆活动有关的矽卡岩矿床和斑岩铜矿。确实,世界上不少地方矽卡岩或斑岩铜矿和浅成低温矿床存在密切的时空关系。从岩浆活动和地质历史的演化来看,这种关系是可能经常存在的。

本文仅限于大陆水热系统,未涉及海底热泉成矿。二者有许多共同特征,但也有许多差异。

### 参 考 文 献

- [1] Nelson CE and Giles DL. *Economic Geology*, 1985 80: 1633~1639.
- [2] Mclaughlin RJ and Donnelly NJM eds. *Geol Surv Prof Paper*, 1141, 237~241.
- [3] Browne PRL. *Sec Min Geol Jap Spec*, Issue 2, 1971, 64~75.
- [4] 朱梅湘和魏琦英. 北京大学地质学系地质研究论文集, 1985, 191~199.
- [5] Silberman ML and Berger BR. In: Berger BR and Bathke PM eds. *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems*.