

第五章 热液矿床概论

- n 第一节 含矿热液的种类与来源
- n 第二节 成矿物质的来源
- n 第三节 含矿热液的运移
- n 第四节 成矿物质的沉淀
- n 第五节 成矿方式
- n 第六节 围岩蚀变
- n 第七节 矿化期、矿化阶段和矿物的生成顺序
- n 第八节 热液矿床的分带性

热液矿床概念、形成物理化学条件

- n 通过含矿热液作用而形成的后生矿床称热液矿床或气水热液矿床（hydrothermal ore deposits）。
- n 流体包裹体研究以及矿物组合的稳定性热力学计算表明，成矿热液一般具有较大的温度（50~500℃）和盐度（所溶解的所有固体组分的百分含量，<5%~>40%）区间，压力一般为 $4 \times 10^6 \sim 2.5 \times 10^8 \text{Pa}$ 。

n 传统上一般认为热液矿床的形成深度不超过6~8Km, 但

- 20世纪80、90年代在前苏联科拉半岛的超深钻11km深度的裂隙中发现了含矿热液, 在德国巴伐利亚KTB超深钻9.1km深度上发现了丰富的含矿卤水。
- Barnicoat等(1991)研究了西澳大利亚南克劳斯省产于角闪岩相和低麻粒岩相区的2个热液金矿床, 发现其成矿温度分别可达500~550 °C和740°C。
- Groves等(1992, 1993)研究认为, 从次绿片岩相到麻粒岩相的变质岩中都有热液脉状金矿产出, 反映至少在15km以上的地壳剖面中, 在不同的垂向深度上可连续形成金矿, 成矿温度变化在180~700°C之间, 成矿压力最高可达 5×10^8 Pa间。

n 热液矿床类型多、特征复杂，具有主要以下特点：

- ①成矿物质的迁移富集与热流体的活动密切相关；
- ②成矿方式主要是通过充填或交代作用；
- ③成矿过程中伴有不同类型、不同程度的围岩蚀变，且常具有分带性；
- ④构造对成矿作用的控制明显，既是含矿流体运移的通道，也是矿质富集沉淀的主要场所；
- ⑤成矿介质（热液）、矿质以及热源直接控制着热液矿床的形成，三者来源往往复杂多样，既可来自同一地质体或地质作用，也可具有不同的来源；

n 热液矿床类型多、特征复杂，具有主要以下特点：

- ⑥热液矿化往往呈现不同级别、不同类型的原生分带（以矿物或元素的变化表现出来）；
- ⑦形成的矿床种类多，除铬、金刚石、少数铂族元素（如钌、铱）矿床外，与多数金属、非金属矿床的形成都与热液活动有关，如铜、铅、锌、汞、铋、钨、钼、钴、铍、铌、钽、镉、铈、铁、金、银、萤石、重晶石、天青石、明矾石、温石棉矿床等。因此，热液矿床具有重要的经济价值。

1. 岩浆成因热液 (magmatic fluid)

- n 指在岩浆结晶过程中从岩浆中释放出来的热水溶液，最初是岩浆体系的组成部分。由于岩浆热液中常含有 H_2S 、 HCl 、 HF 、 SO_2 、 CO 、 CO_2 、 H_2 、 N_2 等挥发组分，故具有很强的形成金属络合物并使其迁移活动的能力。
- n 很多证据表明岩浆水的存在有多方面的证据，如：
 - 快速冷却的火山岩含水量一般为0.2%~5%，最高可达12%（如某些松脂岩）；
 - 岩浆岩大量的含水硅酸盐矿物也是岩浆含水的最好证明。
 - 对热液矿床中矿物及其中流体包裹体氢氧同位素成分的分析结果，也证实部分热液矿床形成的早期，确有岩浆流体存在。

1. 岩浆成因热液 (magmatic fluid)

很多证据表明岩浆水的存在有多方面的证据，如：

- 岩浆流体从岩浆析出的过程和数量，与岩浆结晶的深度、温度、初始含水量、成分和流体相的组成有关，也受到围岩渗透性和裂隙系统发育程度的影响，其中最重要的是岩浆侵位深度和岩浆的初始含水量。
- Burnham (1979) 实验表明，岩浆中溶解的H₂O重量百分比随压力的升高而加大 (图5-1)。

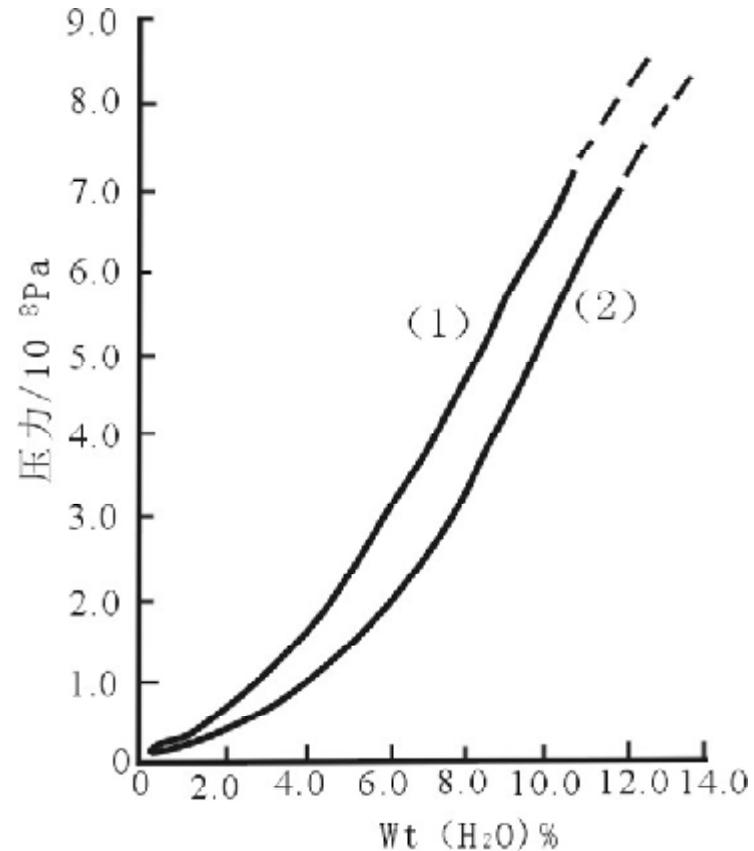


图 5-1 水在硅酸盐熔浆中的溶解度图解

(据 Burnham, 1979)

1. 岩浆成因热液 (magmatic fluid)

n 很多证据表明岩浆水的存在有多方面的证据，如：

- 如果深处形成的岩浆水含量未达到饱和，那么只有当这种岩浆上升到近地表处，或在岩浆结晶的晚期或末期，当无水的硅酸盐矿物（如辉石、长石等）部分或大部分结晶以后，在构造活动或水热爆发作用打开裂隙时，才有较少的岩浆气液析出；
- 相反，初始含水量很高，在深处就已成为水和其他挥发分饱和的硅酸盐熔浆，在较深处或在岩浆结晶较早阶段，即可有岩浆流体相析出。
- 在岩浆流体析出的过程中，其组成不断发生变化， H_2O 、 HCl 、 HF 、 H_2S 、 SO_2 、 CO_2 的相对比例常随时间而有所改变

2. 变质成因热液 (metamorphic fluid)

- n 指岩石在进化变质作用过程中所释放出来的热水溶液。岩石遭受进化变质作用时，总伴随着矿物的脱水反应，而且脱水同变质的强度成正比，如沉积岩的平均含水量为5.54%（少数沉积岩含水可高达15%以上），经过变质作用，这些水可被逐渐排出。
 - 如果沉积岩在变质过程中释放出4%的水，则1km³的沉积岩可释放出约1亿吨水。
 - 低级变质岩（如绿片岩）遭受到高温高压作用转变为高级变质岩（如角闪岩相和麻粒岩相变质岩）的过程中，也可排出水。
- n 对某些热液矿床（如部分变质岩中的金矿床）矿物中流体包裹体和同位素成分的研究，也证明有的热液矿床主要是在变质水参与下形成的。变质成因热液也具有很强的溶解迁移金属络合物的能力。

3. 建造水 (formation water)

- n 指沉积物沉积时含在沉积物中的水，因此又称封存水。这种水最初来自地表，与沉积物一起沉积，并与矿物颗粒密切接触，长期埋藏于地下，并与其周围的矿物发生反应，使其丧失了原有地表水的性质，形成了自己独特的特征，并在氢氧同位素组成方面也与地表水不同。
- n 建造水广泛见于油田勘探过程中。
- n 很多数据资料表明，有的低温铅锌矿床主要是与建造水构成的热液活动有关。

4. 大气水热液 (meteoric fluid)

- n 包括雨水、湖水、海水、河水、冰川水和浅部地下水。加热的大气水广泛参与热液成矿作用，是20世纪60年代以来在热液矿床研究中取得的一项重要成果。
- n 在现代活火山活动区（如新西兰），以天水为主的热泉中在形成Au、Ag、Sb、Hg、W矿床；
- n 红海的阿特兰提斯海底部，温度和盐度都很高的海水形成了巨大的金属泥质沉积物；
- n 美国南加利福尼亚索尔顿（Solton Sea）热水，含盐度可高达36%，含银达 2×10^{-6} ，铜达 25×10^{-6} ，铅达 100×10^{-6} ，锌达 700×10^{-6} ，其成分也以天水为主。

4. 大气水热液 (meteoric fluid)

- n 东太平洋北纬 21° 所进行的海底调查中发现海底热水活动正在形成块状硫化物矿床;
- n 冲绳海槽和西南太平洋发现类似的海底成矿作用; 目前已经发现几百个正在活动的海底喷流热卤水池。
- n 大量的岩浆岩及其相关流体的氢、氧同位研究表明, 在岩浆流体成矿系统中早期成矿以岩浆流体为主, 但中晚期通常有不同比例的大气水的混入, 即使是发育于斑岩体内外接触带的斑岩型铜矿也都显示成矿后期有大气水的加入, 甚至在一些热液矿床中成矿流体以大气水为主。

5. 幔源初生水热液 (mantle fluid)

n 指幔源挥发分流体，其最初来源可以是核幔脱气，也可以是大洋岩石圈俯冲到上地幔中脱气，是在地幔中形成的一种高密度的超临界流体，多数研究者认为属C-H-O体系，挥发分以 H_2O 和 CO_2 为主，含少量的F、Cl、S、P及惰性气体等组分，其中溶解了大量的微量及常量元素，为还原性流体；弱还原条件下以 H_2O-CO_2 为主，在强还原条件下则以 $CH_4-H_2O-H_2$ 为主。

5. 幔源初生水热液 (mantle fluid)

- n 幔源流体在向地壳运移过程中，可以参与热液成矿作用，主要表现在：
 - ①幔源C-H-O流体溶解深部成矿元素并带入地壳成矿；
 - ②幔源C-H-O流体改造地壳物质，使其中的成矿元素发生活化转移成矿；
 - ③幔源C-H-O流体含有较多的碱质和硅质，它可以直接为某些热液矿床提供这类物质；
 - ④幔源C-H-O流体可以在地壳中产生异常高的地热梯度，加速地壳浅层水的深循环，或与浅层水混合形成对流的循环系统而成矿。

1. 岩浆熔体

- n 在岩浆结晶过程中，岩浆中的成矿物质随着岩浆热液的析出，多以络合物的形式进入热液，形成含矿热液。由于许多金属阳离子，如 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Cu^+ 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 等，易形成氯络合物，因此热液和岩浆中 Cl^- 的浓度高低与热液形成矿床的能力有一定关系。其他挥发性组分，如 CO_2 、 CO 、 H_2S 、 SO_2 、 HF 等与岩浆热液的含矿性也有关系。岩浆热液的其他物理化学性质也会影响热液的含矿性。
- n 这种情况下，热液介质和矿质来源一致。

2. 地壳岩石

- n 不同来源的热液，在其源区或其运移过程中与不同类型的地壳岩石发生反应，从而捕获其中的成矿物质，形成含矿热液，进而成矿。几个因素决定了地壳岩石对热液成矿作用过程中成矿物质的供应：
- ①岩石中成矿组分的最初含量；
 - ②热液流体循环过程中所影响的岩石的体积（范围）；
 - ③岩石和所流经的热液之间发生水岩反应的强度；
 - ④水-岩比值（即参与反应的流体质量和发生反应的岩石质量之比）的大小。

2. 地壳岩石

n 前述的各种来源的热液均可把地壳岩石中的成矿物质活化出来，并使之迁移、富集成矿。热液沿围岩的裂隙、孔隙渗滤、运移时，可以与围岩中组分发生反应，这一过程通常称为水岩反应。通过水-岩反应，一部分物质溶解，使热液中金属组分含量升高，并使围岩中原有金属元素的含量减小。

— 例如：江西德兴铜矿，远离矿体的九岭群中元古界火山-沉积岩系平均含铜 55×10^{-6} ；紧邻矿化-蚀变带的外围有一环形含铜量低值区，宽2~5 km，平均含铜 40×10^{-6} ；而在矿化蚀变带中含铜在 $(100 \sim 1000) \times 10^{-6}$ 以上，矿化蚀变带中的铜有一部分来自铜元素降低的围岩。在成矿物质从围岩滤出的过程中，围岩可发生或强或弱的变化。

2. 地壳岩石

- n 同生热液可以把原来沉积物中所含的铅、锌，在建造水释放过程中带出，某些含铅、锌较高的油田卤水即可能属于这种成因。
- n 变质热液可以从变质原岩中带出或从所流经的岩石中萃取成矿物质。
- n 岩浆热液除了可以把岩浆中的成矿组分带出外，由于其高温特点所决定的高搬运能力，往往会捕获所流经的岩石中的成矿物质而成矿。
- n 被不断加热的大气水热液在其循环过程中，会淋滤所接触的地壳岩石中成矿物质，形成热液矿床。

2. 地壳岩石

n 针对地壳岩石对成矿的物质贡献，矿床学家提出了“矿源层”（source bed）的概念。

- 这一概念最初是由澳大利亚人C.L.奈特（C.L.Knight）于1957年首先提出的，其出发点是认为许多重要矿床和侵入岩之间并不存在成因联系。相反，这些矿床的产出却与某一特殊的沉积层显示出重要关系，它们是成矿物质的提供者。但随着研究工作的不断深入，发现在矿床形成过程中除沉积岩外，变质岩和成矿前已经形成的岩浆岩都可以为成矿提供矿质。
- 因此矿源层的概念已经扩大，包括能够提供矿质的所有岩石，称之为“矿源岩”（source rock）。许多类型矿床的形成与矿源岩有关，如大多数类型的铀矿床，在其形成过程中不同类型的沉积岩、变质岩、火山岩和成矿前的花岗质侵入体可以作为其矿源岩。

3. 上地幔

- n 地幔流体的活动可以把分散在上地幔中的成矿物质活化、迁移到地壳中成矿。这类研究近几年已经不断积累起来，如胶东半岛金矿、四川大水沟碲-金矿以及河北东坪金矿等已经有不同的研究者相继提出地幔流体和地幔物质参与成矿的认识。
- n 由于受技术条件的限制，对参与热液成矿作用的地幔成矿物质的识别，目前尚处在不断的探索之中，但相信随着研究的深入，有关上地幔中成矿物质在热液矿床成矿作用中的贡献会被进一步认识到，并不断总结出系统的研究思路和方法。

1. 含矿热液运移的动力

n (1) 重力驱动 (gravity-driven)

- 在一定的深度范围内，当岩石的渗透率较高时，热液（特别是温度低的地表水和温度较低、深度较浅的地下水）可以在重力驱动下向深部渗流；也可以受地表地形的控制，从重力位能高处向重力位能低处流动。
- 盆地流体的活动主要受重力驱动，而对一些形成深度浅的低温热液矿床（如美国科罗拉多州的克里德Pb-Zn-Au-Ag脉状矿床）以及一些层控矿床在热液叠加改造阶段也会出现这类流动。

1. 含矿热液运移的动力

n (2) 压力梯度驱动 (pressure-driven)

- 在地下较深处，在温度梯度小而较封闭的裂隙系统中，由于压力差较大，可引起热液自深处向上运动，这是由于深处封闭系统承受的压力相当于静岩压力（约为 260atm/km ），深处所承受的压力大于浅部。沉积盆地中压实作用引起的流体运移也属于这种情况。
- 构造运动或水压破裂形成时，裂隙系统内会瞬时形成压力极低状态，围岩孔隙中承受静岩压力的流体会向裂隙集中，这种流动也是压力差驱使的。

1. 含矿热液运移的动力

n (2) 压力梯度驱动 (pressure-driven)

– 流体运移与断裂构造活动之间的关系, Sibson (1988) 提出了2种模式:

n ①泵吸模式 (suction pump) 是指在地壳浅部的脆性构造活动域, 一般指地壳5km以上的区域, 断裂活动时会在断裂中产生瞬间的极低压力, 从而把断裂周围的热液吸入其中, 其原理类似水泵的工作原理, 此时断裂活动是主动因素, 而热液流体在断裂带中的活动是被动的;

n ②断层阀模式 (fault valve) 是指在5~16km的地壳范围内, 构造变形表现为韧脆性或脆韧性特点。此时, 当断裂带中的流体压力不断积累到一定的阀值时, 流体的高压力会引发破裂作用, 流体的活动相对于断裂构造来说是主动的。

1. 各种热液运移的动力

n (3) 热力驱动 (thermally driven)

- 在有岩浆侵入体或其他异常热源存在的条件下，出现了异常的温度梯度并有较高的孔隙度时，将形成对流的热液系统；在近代活火山活动区地热系统的温度分布和热液循环特征已被详细研究，如新西兰的Wairakei、意大利的Larderello、美国的Geysers以及洋中脊地区。

在Wairakei地热区，等温线的分布呈蘑菇型，热流的流速、流向和流量可用一个筒状模型来代表（图5-2）。

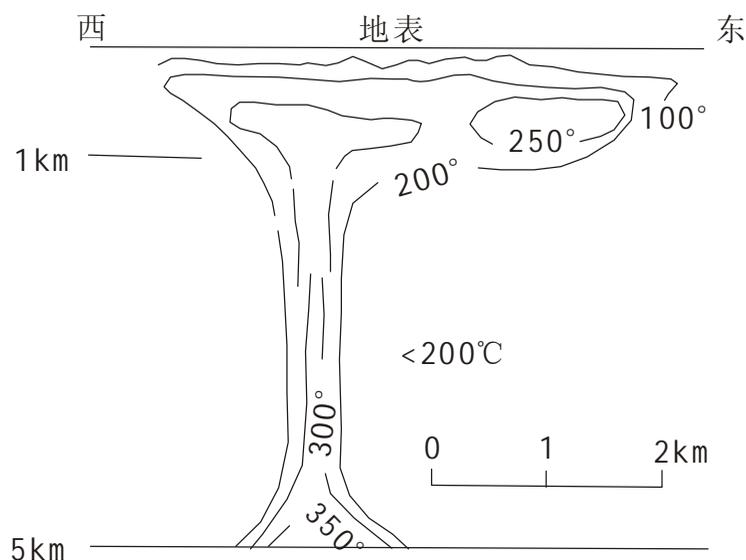


图5-2 Wai rakei 地热区的温度分布

1. 含矿热液运移的动力

n (3) 热力驱动
(thermally driven)

— 在洋中脊或海底火山活动中心 (图 5-3) 及侵入体附近的对流循环路径都有一定的差别 (图 5-4)。

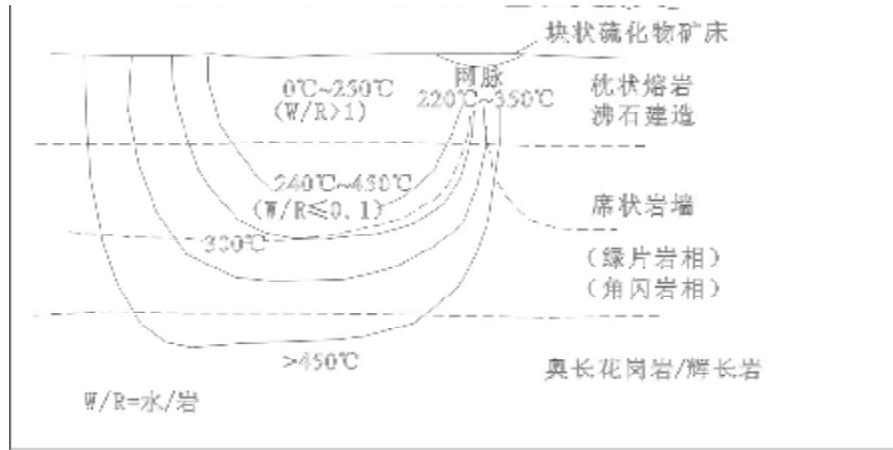


图5-3 海底火山活动中心的对流示意图
(塞浦路斯型块状硫化物矿床, 转引自任启江等, 1993)

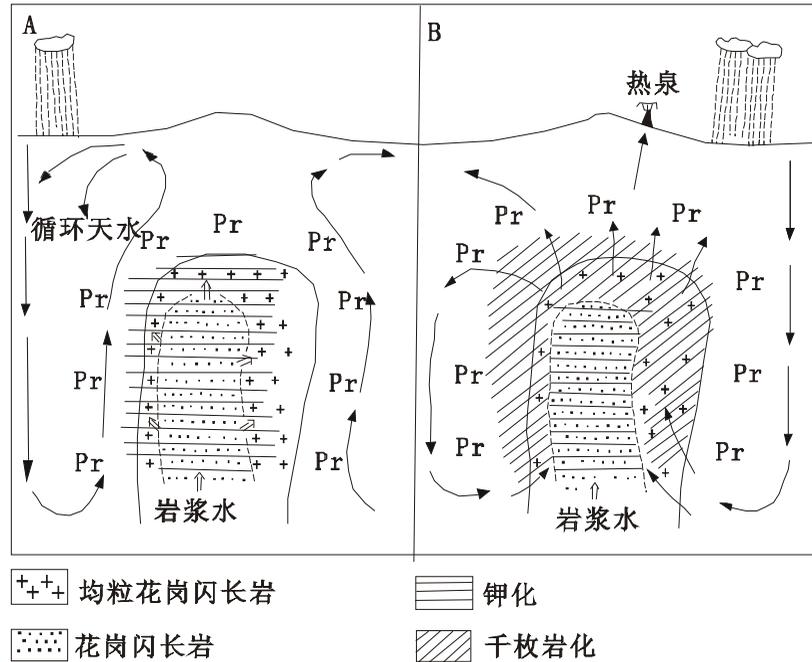


图5-4 小侵入体周围的对流循环示意图 (据Shennard, 1997)

2. 含矿热液运移的通道

n (1) 原生孔隙

- 是指岩石生成时就具有的孔洞和裂隙，如造岩矿物的粒间间隙、火山岩中的气孔、沉积岩的层面空隙等。
- 岩石的孔隙度是全部孔隙的体积与岩石体积之比，用百分比表示。孔隙度的变化范围很大，常见岩石的平均孔隙度（体积%）为：花岗岩0.5%，片麻岩1%，石英岩1%，石灰岩5%，砂岩15%，砂20%。

2. 含矿热液运移的通道

n (1) 原生孔隙

– 对于热水溶液在岩石中的流动来说，有意义的不是孔隙度而是**有效孔隙度**。有效孔隙度是液体能在其中流动的相连通的孔隙体积与岩石体积之比。这里孔隙的绝对大小很重要。可以把孔隙分成3类：

- n ①超毛细管孔隙，直径大于0.5mm，液体能在其中按流体静力学的规律流动；
- n ②毛细管孔隙，直径为0.0002到0.5mm，液体在其中的运移决定于表面引力和外力（气体的压力、静压力、构造压力等）；
- n ③亚毛细管孔隙，直径小于0.0002mm，在一般

2. 含矿热液运移的通道

n (1) 原生孔隙

- 热液流经的岩石的有效孔隙度会发生变化。在成矿前，常常由于溶解和蚀变而增大，如花岗岩钠长石化后，有效孔隙度由0.5%增加到6%；石灰岩矽卡岩化后，由0.4%~0.9%增加到2.5%~5%；在成矿阶段，因矿石矿物和脉石矿物充填，有效孔隙度又重新减小。

2. 含矿热液运移的通道

n (2) 次生裂隙

— 指成岩过程中或成岩以后产生的各种裂隙，包括非构造裂隙和构造裂隙两类。

n 非构造裂隙如沉积物的挤压收缩和侵入岩的冷却收缩所产生的裂隙、溶解裂隙、矿物结晶或重结晶而形成的裂隙、坍塌角砾裂隙等。

n 构造裂隙主要指地壳运动产生的褶皱虚脱、断裂及与之有关的一系列裂隙。此外，需要强调指出的是，热液的构造通道除最常见的断裂构造外，还有超高压流体对围岩进行水压破裂产生的增殖裂隙，这是以往研究中往往被忽视的一种控制热液矿床形成的一种重要构造形式。

3. 成矿物质的运移形式

n (1) 成矿物质呈硫化物真溶液运移

- 由于气水热液矿床中硫化物居多，所以人们就认为金属是呈硫化物形式溶解于热液中呈真溶液运移的。但是，实验证明金属硫化物在水中的溶解度是极小的，如含铜硫化物在温度为25~400℃间的水溶液中溶解度仅为 $10 \times 10^{-6} \sim 2.3 \times 10^{-24}$ 克分子/l，显然难以实现硫化物的大量运移和聚集，铜矿床也不可能由硫化铜溶液形成。因此，硫化物呈真溶液运移的观点现在已经被放弃。

3. 成矿物质的运移形式

n (2) 成矿物质呈胶体溶液运移

- 实验证明，金属硫化物在胶体溶液中的含量比在真溶液中的溶解度大得多，而且胶体可以在各种物理化学条件下形成。人们还发现，热液矿床的矿石中可以经常见到各种胶状构造，认为这是金属组份呈胶体溶液运移的直接标志，所以主张成矿物质是呈胶体溶液运移的。胶体溶液运移成矿组分的论点也没有被人们普遍接受。
- 因为热液矿床中出现胶状构造的现象毕竟不多，它主要出现在一些浅成矿床中。胶状构造的出现可能是成矿时温度下降过速的缘故，但成矿之前成矿物质未必能呈胶体状态。胶体的粘度较大，不易于长距离搬运，无法解释由大量渗透、交代作用形成的热液矿床。通过矿物气液包裹体成分的研究，还发现热液中含多量的电解质，这进一步说明了呈胶体状态运移成矿组分的可能性是极小的。该观点同样已经很少有人提及。

3. 成矿物质的运移形式

n (3) 成矿物质呈卤化物气态溶液运移

- 这个观点认为，溶液中搬运的成矿物质不是现在矿石中所见到的矿物，矿石中的金属矿物在其形成以前是呈卤化物形式在溶液中被搬运的，其依据是：矿物中气液包裹体（代表着含矿气水热液的母液）的含盐度很高，甚至有NaCl晶体出现；火山喷出物中有砷、铁、锌、锡、铅和铜等的可溶性氯化物和氟化物出现；有的热液矿床中可见到含氯或氟的矿物，如氯化铅（ $PbCl_2$ ）、氯铜矿（ $CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_2$ ）、萤石、黄玉等。实验表明，金属卤化物在水中的溶解度是较大的（表5-1）。

表5-1 各种金属卤化物在水中的溶解度（18℃）

阴离子	阳离子	Mn ²⁺	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Ni ²⁺	Cu ⁺	Cu ²⁺	Ag ⁺	Zn ²⁺	Pb ²⁺	Sn ²⁺	Hg ²⁺	Sb ²⁺
Cl ⁻	g/100g 溶液	43.6	40.7	47.9	39.0	1.5	43.1	1.51 × 10 ⁻⁴	78.6	0.96	73.0	6.80	
	克分子/1000g 溶液	3.46	3.21	2.95	3.09	0.15	3.20	1.0 × 10 ⁻⁵	5.76	0.034	3.85	0.25	
F ⁻	g/100g 溶液	0.66			2.50			57.5	0.8	0.006			81.64
	克分子/1000g 溶液	0.07			0.25			4.52	0.077	0.0026			4.56

3. 成矿物质的运移形式

n (3) 成矿物质呈卤化物气态溶液运移

- 多数研究者认为，成矿物质呈卤化物气态溶液运移的情况是存在的。不过主要出现于温度较高的热液矿床中，如云英岩型钨、锡矿床可能就是以这样的形式运移和成矿的。据实验得知，金属卤化物和硫化氢极易反应形成硫化物沉淀，所以当溶液中存在数量较多的 H_2S 时，卤化物溶液就变得很不稳定。众所周知， H_2S 在热水溶液中的溶解度是随温度的降低而增高的，所以在温度较低的情况下，成矿组分是难以成卤化物搬运的。

3. 成矿物质的运移形式

n (4) 成矿物质呈易溶络合物运移

- 大量实验和理论研究证实，在热液矿床形成过程中，金属成矿元素主要呈**络合物**形式搬运，这也是目前人们普遍接受的观点。在自然界中很多元素都可以构成络合物的组成部分，如某些离子电位高的金属阳离子（ Fe^{3+} ， Fe^{2+} ， Be^{2+} ， Nb^{5+} ， Ta^{5+} ， W^{6+} ， Sn^{4+} ， Mo^{4+} ， Mo^{6+} 等）构成中心阳离子（或称络合物形成体）；一些阴离子或离子团（如 F^- ， Cl^- ， HS^- ， HCO^- ， OH^- ， O^{2-} ， S^{2-} ， SO_4^{2-} ， CO_3^{2-} 等）构成配位体，而碱金属阳离子则构成外配位体，不同的络合物可在各种地质-物理化学条件下出现。络合物比简单化合物的溶解度大许多倍，可以搬运大量成矿物质。进入络阴离子中的金属元素，可以具有与简单阳离子完全不同的化学特性，易于解释热液矿床中观察到的各种现象。

3. 成矿物质的运移形式

n (4) 成矿物质呈易溶络合物运移

- 一些有关的成矿实验和化学热力学计算结果也支持金属矿物质主要呈络合物形式被搬运的观点，并且还提供了金属元素络合物稳定性的数据。络合物在水溶液中的稳定性，主要取决于络阴离子解离能力的大小，络阴离子解离能力越强，则络阴离子越不稳定，因此，在溶液中出现金属离子越多。络合物在溶液中的稳定程度，可用络合物不稳定常数 k' 表示，如下列络合物分解的反应式：



$$k' = [\text{Pb}][\text{Cl}]^4 / [\text{PbCl}_4]$$

- k' 值越大，则络阴离子越不稳定；反之，则越稳定。在一定的热液体系中，由于各种元素络合物在热液中稳定性不同，因此络合物的稳定性大小也不同，随着热液物理化学性质的变化，络合物稳定性也将发生变化，这是导致矿床形成过程中不同元素分别析出，产生各种分带性的原因之一。

1. 温度

n 在热液矿床形成过程中，由于热液体系物理化学性质的变化，造成络合物稳定性的破坏使金属元素及其化合物沉淀、析出，其中温度的降低和pH值的变化常常对络合物的稳定性影响最大。此外，其他机制也会影响络合物的稳定性。

n 1. 温度

– 有些络合物只在较高温度下稳定，而在低温下分解，如 $[\text{PbCl}_4]^{2-}$ ，当温度从 200°C 降低到 100°C 时，其稳定性变化不大，而从 100°C 降至 90°C 时，可导致 5×10^{-6} 的 Pb 沉淀析出，



– 又如铁的氯络合物，只在 300°C 以上稳定。在 350°C 时，在中性-弱酸性条件下，铁的溶解度可达 $n \times 10^{-5} \sim n \times 10^{-3}$ ，而在低于 250°C 时，几乎不能形成铁的氯络合物。

2. pH值

- n 金属氯络合物的稳定性严格受pH值的控制。当体系的 H_2S 浓度（活度）和 Cl^- 的浓度一定时，pH值变化1个单位，金属氯络合物的浓度可变化2个数量级。pH值越小，越易使氯络合物稳定，例如：若 H_2S 浓度不变， $NaCl=3g/l$ ， $t=100^\circ C$ ，当 $pH=5$ 时， PbS 的溶解度为 1.47×10^{-6} ，当 $pH=3$ 时，则可升至 147×10^{-6} 。相反；硫络合物（如 Na_3AsS_3 ）在碱性溶液中稳定，若pH值减小，则可发生沉淀。还有的络合物只在一定的pH条件下稳定，如 $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ （三碳酸铀酰），只在pH为7.2时稳定，而pH值增加或减少都将引起沉淀。

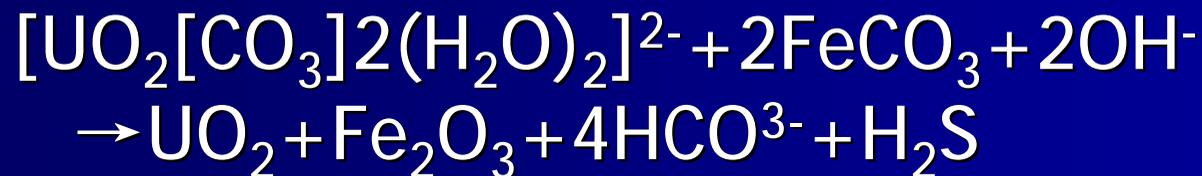
3. 压力变化

- n 通常，当热液体系的压力降低时， H_2S 、 CO_2 等挥发分在热液中的溶解度减小，从而降低体系中 S^{2-} 、 $[\text{CO}_3]^{2-}$ 的浓度，促使含有 S^{2-} 、 CO_3^{2-} 等的络合物稳定性降低，使金属阳离子析出，如：



4. 氧化还原作用

- n 如以 U^{6+} 为中心阳离子的络合物与围岩中的 Fe^{2+} 作用，被还原为 U^{4+} 时，络合物分解，产生晶质铀矿：



5. 与围岩反应

- n 如 W^{6+} 为中心阳离子的络合物与围岩反应，生成钙钨矿：



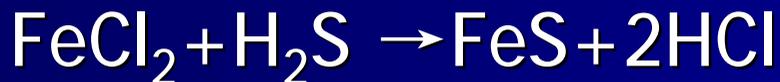
- n 因此，白钨矿经常生成于碳酸盐围岩中。

6. 不同来源热液的混合

- n 由于不同来源的热液，其物理化学性质常有明显差别，当它们混合以后，会引起体系物理化学性质的明显变化，从而破坏了络合物的稳定性，如含 H_2S 较高的热液与不含 H_2S 的热液混合时，可以降低 S^{2-} 或 HS^- 的浓度（或活度），引起含硫络合物的分解，如下式生成辉锑矿的反应。



- n 与上述情况相反，当富含 H_2S 的热液与富含重金属卤化物热液相混合时，则可生成硫化物沉淀：



- n 许多研究者都强调混合作用对热液矿床的形成十分重要。

7. 水解

- n 一些高价阳离子络合物在较高温度下，常发生水解反应，生成氧化物或氢氧化物的沉淀；



8. 沸腾

- n 在某些浅成、超浅成甚至部分中深成热液矿床形成过程中，沸腾现象可能起非常重要的作用。在沸腾过程中，气相组分大量析出，由于 H_2S 、 CO_2 、 HCl 、 HF 等的减少，将促使残留的液相pH升高，气相的酸度增加，引起溶液盐度变化， Cl^- 、 F^- 、 S^- 、 HS^- 等的活度减小，温度和压力也可发生较大变化，这些都可能导致热液矿物沉淀、析出。

- n 此外，成矿期间的构造活动，促使裂隙打开、复活，甚至诱发激烈的气液爆发现象，引起体系物理化学性质的改变，因而对热液矿物的沉淀析出产生较大影响。
- n 不同类型的络合物稳定性与热液体系的物理化学性质有密切的关系。按照热力学计算结果可知：
 - ①重金属氯络合物在酸性介质中和 ΣH_2S ($H_2S + HS^- + S^{2-} + \dots + nH^+$) 总浓度低时才稳定，许多重金属热液矿床的成矿热液具有此种条件，因此在热液中重金属呈氯络合物迁移的可能性最大；
 - ②重金属硫氢络合物（含 HS^- ）在高的 ΣH_2S 浓度和碱性-中性介质中稳定，要求 $\Sigma H_2S > 1$ 克分子/L，而一般热液矿床多低于此数值（多为0.3~0.4克分子/L以下），因此重金属呈硫氢络合物形式迁移的可能性较小；
 - ③含碳酸根的重金属络合物必须满足 ΣH_2S 总浓度低、 CO_2 分压高、碱性介质等条件，在碳酸盐围岩中有利于此类络合物形成。

1. 充填成矿方式

n 当含矿热液在化学性质不活泼的围岩中流动时，因物理化学条件的改变，使热液中成矿物质沉淀于已有的各种裂隙和孔隙中，这种作用称为充填作用，以这种方式形成的矿床即为充填式矿床。

n 在充填式矿床形成过程中，成矿溶液与围岩间化学反应较弱，形成深度一般较浅。矿床中常出现一些特征的矿石构造，最常见的是脉状-条带状构造，还发现其他一些构造如梳状构造、晶簇状构造、皮壳状构造、角砾状构造、鸡冠状构造、同心圆状构造等（图5-5），还有一些特征的结构，如胶状结构、变胶状结构等。

n 矿体与围岩的接触界线规则、突变，矿脉两壁平直或相互吻合，不存在明显的交代作用现象。

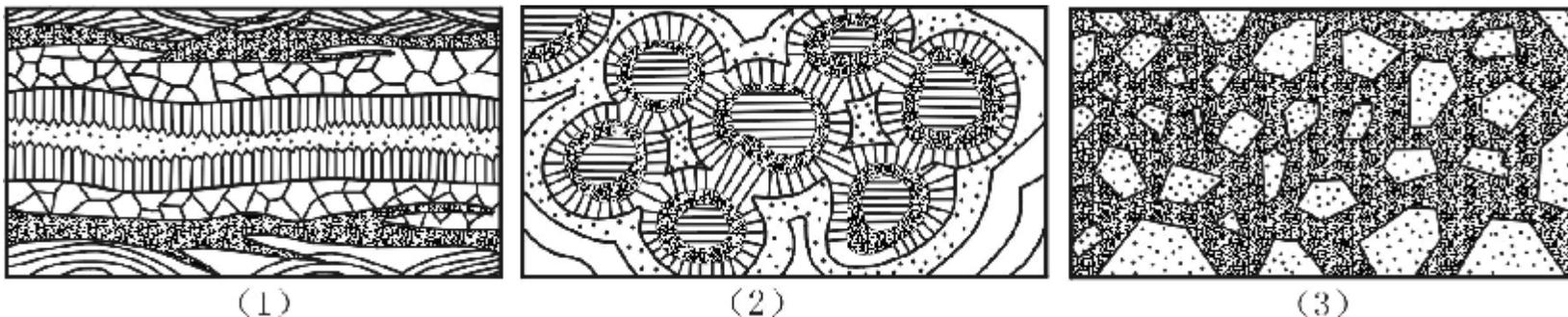


图5-5 充填式矿床中常见的矿石构造示意图（转引自任启江等，1993）

2. 交代成矿方式

- n 交代作用系指改变岩石化学成分的各种置换作用，由此作用生成的矿床称交代式矿床。
- n 交代作用特点是原有组分的溶解、带出与新组分的替代同时进行。在交代过程中被交代部分的体积基本上不发生变化，但是这种关系不是绝对的。如果带入量大于带出量时，则新形成的交代矿物体积可大于原来体积，反之体积变小。交代作用生成的矿物可保持原有被交代矿物的形态和岩石结构构造的细节特征。
- n 决定交代作用特征的主要因素是被交代岩石和矿物的化学成分、热液体系的物理化学性质，以及热液的流体动力学特征等。

2. 交代成矿方式

n 交代作用可分为2种类型：

- ①扩散交代作用，交代发生于停滞的溶液内，主要以离子或分子扩散方式进行，即组分的带出和带入是由于浓度梯度所引起；
- ②渗滤交代作用，交代作用发生于流动的溶液中，即组分的带出、带入是由流经岩石的溶液来进行的，这种交代作用常常更重要。渗滤交代作用是由于溶液中组分与围岩中组分发生了化学反应，并且由于热液不断的运移，使热液-围岩处于不平衡状态所引起。

2. 交代成矿方式

- n 交代矿床的鉴别标志是交代作用的产物保持原岩的矿物假象和结构、构造特点，如层理、化石、片理、角砾构造、褶皱构造等，并可以见到围岩残留体。矿体外形不规则，出现穿切层理的完好晶体，矿体与围岩边界可以逐渐过渡（图5-6）。

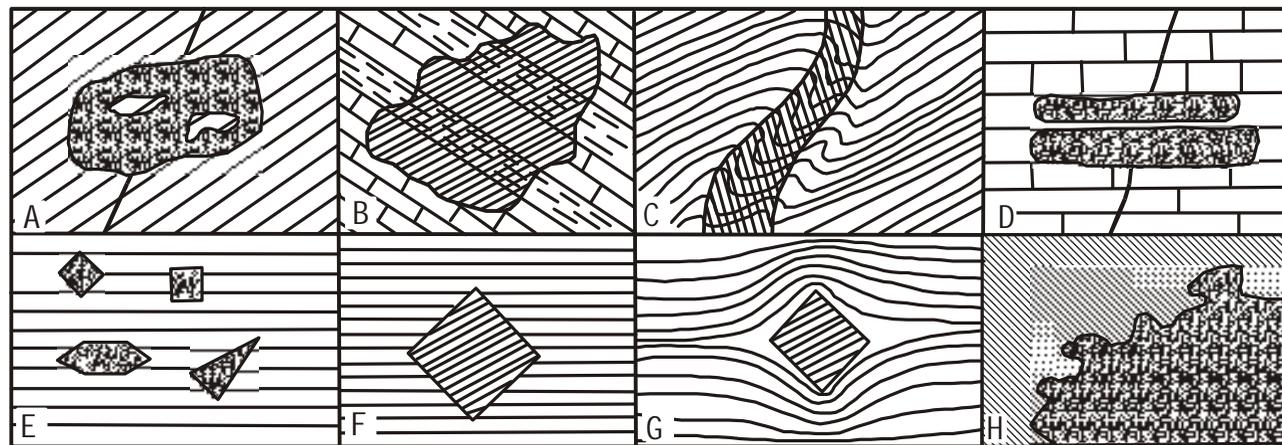


图5-6 交代式矿床中常见的矿石构造和交代矿床的特征示意图（据Beteman, 1979）

A-无支撑的残核；B-保存的岩石地层；C-保存的褶皱构造；D-沿层面分布的矿体；E-两端尖灭的晶体（穿切层理者明显为交代成因）；F-交代成因的变斑晶；G-非交代成因的变斑晶（在已有页岩中生长）；H-交代成因矿体外形不规则

n **围岩蚀变** (wall-rock alteration) 通常是指成矿围岩在气-液和超临界流体作用下所发生的化学成分和物理性质的变化。这种变化主要是由于围岩在受到热液作用或含矿热液作用时，与热液体系处于热力学不平衡状态所引起，为了使围岩与热液达到平衡态，围岩与热液组分之间必定要发生化学反应及其他相应变化，使新矿物形成，旧矿物消失，这种热液引起的组分带出、带入的变化称为**围岩蚀变**。

n **蚀变岩**是指蚀变过程中在一定物理化学条件下处于相对平衡状态的矿物共生组合所构成的岩石。蚀变岩应全部由蚀变矿物组成，同一平衡矿物组合内各种矿物没有交代关系，几乎是同时形成的，具有变晶结构，如矽卡岩、云英岩、电英岩、青盘岩、钠长岩、石英钠长岩、钾长岩等。

- n 如果原岩未被完全交代，仍有原生矿物残留，具变余结构，则可称为**某某化岩**，如云英岩化花岗岩、青盘岩化安山岩、绿泥石化闪长岩、钠长石化花岗斑岩等。
- n 影响围岩蚀变的主要因素有原岩的物理化学性质、热液体系的物理化学特征，如各种组分的活度、pH、Eh、温度、压力等。
- n 热液流体是热和许多化学组分的有效载体和传输体，往往与所接触的围岩间存在明显的物理-化学梯度，因此热液成矿作用过程中常常伴随有围岩蚀变的发生，也可以说围岩蚀变作用是热液成矿作用的重要组成部分。

围岩蚀变研究具有重要的实际意义

n 首先，蚀变围岩大多分布在矿体周围，其轮廓和矿体形态基本一致，有的蚀变围岩由于受岩性、构造等影响，形态比较复杂，但空间上也总是在矿体附近。由于蚀变围岩的范围一般都较矿体广，且离矿体愈近，围岩遭受的变化也愈为剧烈，即蚀变强度愈大。再就是，围岩蚀变常呈带状分布，因此通过蚀变分带的研究，可以帮助确定矿体的位置。所以，蚀变围岩可作为热液矿床的重要找矿标志。

n 第二，一定的围岩蚀变类型常和一定的矿床类型有关，因此可以通过确定围岩蚀变的类型来判别可能找到的某种类型的矿床。如云英岩化经常伴生有脉状钨、锡、钼矿化和金矿化；钾化、硅化和绢云母化的蚀变组合往往和斑岩型铜、钼矿床共生；白云岩化和硅化围岩的蚀变围岩是寻找铅、锌矿床的重要标志。有的蚀变围岩本身就是矿体，如明矾石化除可作为寻找某些金、铜矿床的标志外，所形成的明矾石往往就是具工业价值的矿床。

n 第三，通过围岩蚀变的组合及分布特征，可以帮助识

研究围岩蚀变有重要的理论意义

- n 首先，温度和其他物理化学条件对热液蚀变的类型有重要影响，因此通过围岩蚀变的研究可以帮助恢复成矿的物理化学条件。例如，花岗岩类岩石在高温条件下，钾长石被蚀变为白云母和石英，颗粒都较粗大，形成云英岩。在中温条件下则蚀变成为绢云母和细粒石英，形成绢英岩，这样围岩蚀变类型就可以帮助确定热液矿床形成的大致温度。
- n 其次，根据蚀变围岩和原岩间的成分差异，可推断热液的化学成分和元素的转移特征。并可根椐蚀变组合的空间分布及其形成顺序来推测成矿物质的搬运、沉淀条件和成矿作用过程。

(1) 云英岩化

- n 此类蚀变乃是硅铝质岩石受高温气水热液作用而成，如花岗岩的云英岩化，主要是钾长石，斜长石受热液作用分解成为石英和白云母。



- n 蚀变过程中有时有F、B等挥发分及其他金属加入和CaO、Na₂O、K₂O、Fe₂O₃及部分Al₂O₃的带出。除原生矿物转变而来的白云母和石英外，蚀变矿物尚有锂云母、电气石、黄玉等，伴生的金属矿物主要是黄铁矿、毒砂、黑钨矿、锡石、辉钼矿等。
- n 和云英岩化有关的矿床主要是钨、锡、钼和金矿床。钨锡往往相伴产出，可分2种类型，一类是很少或完全不含硫化物的钨锡矿床，这类矿床占绝大多数，空间上多产于花岗岩内；另一类是含相当数量的Fe、Cu、As、Bi、Mo、Pb、Zn的硫化物，这类矿床较少，主要和花岗闪长岩有关。

(2) 硅化

- n 硅化是一种最普遍的围岩蚀变，高温至低温均可形成，但以中温热液矿床中最为常见。围岩遭受硅化后其中的 SiO_2 含量大大增加。形成硅化的 SiO_2 一般是由热液带入的，部分是原岩中的 SiO_2 残留、相对富集而成，如中酸性火山岩经热液作用后，大部分活动性组分被带出，只剩下比较稳定的二氧化硅，由此形成的硅化岩石习惯上称之为次生石英岩。
- n 硅化蚀变经常和绢云母化、碳酸盐化、云英岩化等相伴产出，和硅化蚀变有关的矿产主要有铜、钼、铅、锌、金、银、汞、锑以及明矾石等。

(3) 碳酸盐化

- n 这是一种比较常见的中、低温热液蚀变类型。碳酸盐化的结果是蚀变岩石中形成相当数量的方解石、白云石等碳酸盐类矿物。
- n 闪长岩、辉长岩等岩浆岩的碳酸盐化是中温热液蚀变的产物，与之有关的矿产主要是铜、铅、锌。
- n 石灰岩、白云岩遭受中、低温热液蚀变时也可形成碳酸盐化，有时主要形成白云石，可称白云岩化。这类蚀变围岩是寻找铅、锌、汞、锑矿床的良好标志。
- n 围岩蚀变在空间上常出现分带性，在时间上具有多期多阶段性。表5-2是其他的几种常见的围岩蚀变。

蚀变岩	主要原岩	主要矿物组合	形成条件	有关矿产
矽卡岩化	碳酸盐岩、富钙质火成岩及其他沉积岩、火山沉积岩	石榴子石（钙铝-钙铁）、辉石（透辉石-钙铁辉石）及其他钙、铁、镁、铝硅酸盐矿物	火成岩接触带附近，主要在中等深度、高一中温条件下	Fe、Cu、Pb、Zn、W、Sn、Be、Mo等
钾长石化	酸性火成岩为主，其次是中性火成岩及较富长英质的沉积岩、沉积变质岩	微斜长石、透长石、正长石、冰长石等	多为高温，冰长石为低温	W、Sn、Be、Ta、Cu、Mo、冰长石化与Au、Ag、Cu、Pb、Zn矿化有关
钠长石化	主要为酸性、中性、基性、碱性火成岩	钠长石（可与石英、浅色云母、方柱石、霓石、绿泥石、绿帘石组合）	高-低温热液	①Be、Nb、Ta、REE； ②Fe、Cu、P； ③Nb、REE、Zr、Ti、P； ④Cu、pb、Zn
黑云母化	含有铁镁质组分的各类岩石（火成岩、沉积岩、变质岩）	黑云母、浅色云母、石英、电气石、钾长石、黄铁矿、磁黄铁矿、角闪石	高温（富钾）热液	Cu、Mo、Fe、某些稀有金属矿化

蚀变岩	主要原岩	主要矿物组合	形成条件	有关矿产
青盘岩化	中性、弱酸性火成岩（其次是基性火成岩及其他岩石）	绿泥石、碳酸盐矿物、黄铁矿、绿帘石、黝帘石、钠长石、绢云母、石英	中低温（中性、含SO ₂ 、H ₂ S的溶液）	Cu、Fe、Au、Ag、黄铁矿、Pb、Zn、Ni、Co、U
泥质蚀变	酸性火山岩、次火山岩及其他各种岩石（常富硅、铝）	高岭石、迪开石、水云母、蒙脱石、石英、绢云母	低温（酸度多较高）	Au、Ag、Cu、Pb、Zn、W、萤石、重晶石、明矾石
蛇纹石化	超基性岩、富镁碳酸盐岩	滑石、菱镁矿、金云母、蛇纹石	中-低温	石棉、滑石、铁、菱镁矿、硼镁铁矿
沸石化	火山沉积岩、中性酸性火成岩	各种沸石、方解石、石英	低温、浅成	沸石

n 矿化期（**metallogenic epoch**）代表一个较长的成矿作用过程，它是根据成矿体系物理化学条件的显著变化来确定的，也就是说，不同成矿期形成的热液矿物，其形成的物理化学条件有明显差别，例如：

- 宁芜地区玢岩铁矿中磁铁矿主要形成于高温热液期，温度为 $550\sim 350^{\circ}\text{C}$ ，硫的活度较低；而黄铁矿则形成与其不同的物理化学条件下，温度为 $150\sim 300^{\circ}\text{C}$ 左右，硫的活度较高，只形成于中-低温热液成矿期。
- 内蒙白云鄂博铁、稀土矿的形成经历了沉积、变质和岩浆热液等3个成矿期。不同成矿期形成的围岩蚀变、矿物组合、伴生组分、矿石结构构造，甚至矿体形态、产状都可能明显差别。

2. 矿化阶段

- n 矿化阶段（metallogenic stage）为成矿期内进一步划分的较短的成矿作用过程，它常紧密地与热液的演化、构造裂隙的阶段脉动，以及与此有联系的间歇性热液活动有关。
- n 每一个矿化阶段代表一次构造-热液活动，不同矿化阶段的产物可以产于同一裂隙系统中，也可出现于不同方向的裂隙系统中。

2. 矿化阶段

n 划分矿化阶段的主要标志是：

- ①交截矿脉：早阶段生成的矿脉被晚阶段矿脉所交截，并使早阶段矿脉错动；
- ②晚阶段生成的矿物集合体构成细脉，穿切了早阶段矿物组成的脉体，并产生不同程度的交代作用；
- ③早阶段生成的矿物或矿物集合体破碎成角砾，并被晚阶段生成的矿物集合体所胶结；
- ④晚阶段生成的矿物集合体交代早阶段形成的矿物集合体；
- ⑤矿脉内或矿体内出现不对称条带状或条纹状平行矿脉或交切矿脉，条带或条纹中矿物属于晚阶段产物。

2. 矿化阶段

- n 划分矿化阶段的其它标志：
 - 不同矿化阶段的矿物或矿物集合体的成分、结构、晶型、颜色、分布规律或其他特征、围岩蚀变可有一定的差别；
 - 不同矿化阶段含矿裂隙的力学性质、分布、产状也可有一定差别，不同矿化阶段元素对的相关性和特征的元素组合亦可有所不同，
 - 不同的成矿阶段有用元素的富集程度往往有很大差别
- n 矿化阶段的正确划分对于查明有用组分的分布规律、预测深部矿体、认识成矿条件和成矿过程等很重要，是野外和室内进行矿床研究的主要工作内容之一，具有较大的理论和实际意义。

3. 矿物的生成顺序

- n 在同一矿化阶段中不同矿物结晶的先后顺序叫做矿物的生成顺序（paragenetic sequence）。
- n 在热液矿床中矿物沉淀的先后顺序从属于地球化学的规律性。在一般情况下，生成顺序符合晶格能降低的顺序，但此顺序也可被其他因素如浓度、pH值和Eh值等所影响。
 - 正常情况下，脉石矿物的结晶顺序，首先是硅酸盐，然后是石英，最后是碳酸盐和硫酸盐类矿物（如方解石、天青石和硬石膏等）。
 - 矿石矿物形成的次序也有规律，一般情况下首先形成高价离子的氧化物和含氧盐。如黑钨矿、锡石、独居石、黄绿石、磁铁矿等；其次是铁、镍、钴、铜、铅、锌等二价元素的硫化物和砷化物，如磁黄铁矿、毒砂、黄铁矿、针镍矿、砷镍矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等；再次为砷、锑的硫化物以及金、银的硒化物和碲化物。

3. 矿物的生成顺序

n 确定矿物生成顺序的主要标志有：

- ①穿插，一矿物穿插另一矿物或矿物组合，被穿插者生成较早；
- ②交代，先成的矿物被后成的矿物所交代，常显交代残余结构；
- ③包围，先成矿物的全部或一部分被后成矿物所包围；
- ④粒间位置，后成矿物生成于先成矿物的颗粒之间；
- ⑤假象，先成矿物被后成矿物交代后，尚保留其原来晶形。如磁铁矿变成假象赤铁矿后仍保留其等轴晶系的晶形；
- ⑥构造，在对称带状构造中，外层矿物早于内层矿物，晶洞构造中的矿物一般晚于洞壁的矿物。

n 由于热液矿床形成过程多比较复杂，研究矿物的生成顺序时，要全面、综合考虑以上标志，并根据具体情况加以确定，因矿物生成顺序不是固定不变的，可出现反常现象。

第八节 热液矿床的分带性

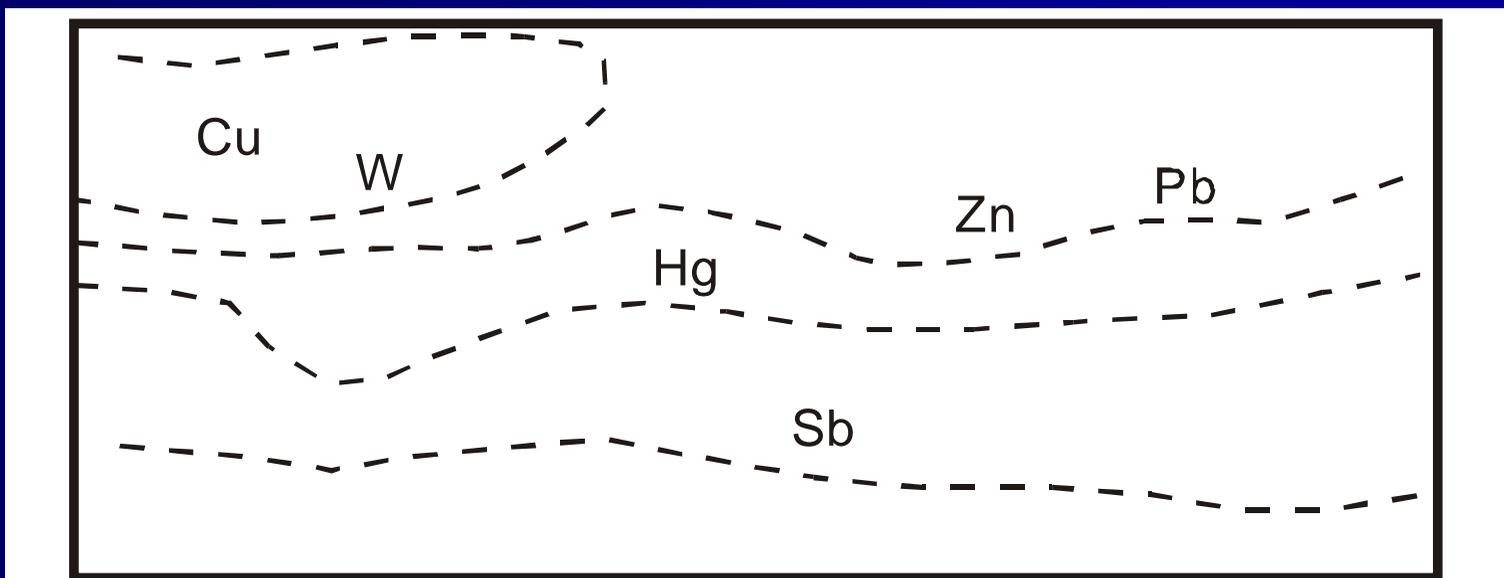
- n 热液矿床的分带（zoning）是指与单一矿床或一定区域内的一组矿床有关的矿物或元素在空间上的有序分布形式。
- n 热液矿床的分带现象十分普遍，且不同类型的热液矿床分带规律常常有很大差别。一般从分带的规模等级和分布样式两个基本方面来描述和识别热液矿床的分带性。

I. 分带规模等级

按规模和级别，矿床的分带性可分为区域分带、矿田分带、矿床或矿体分带。

n (1) 区域分带

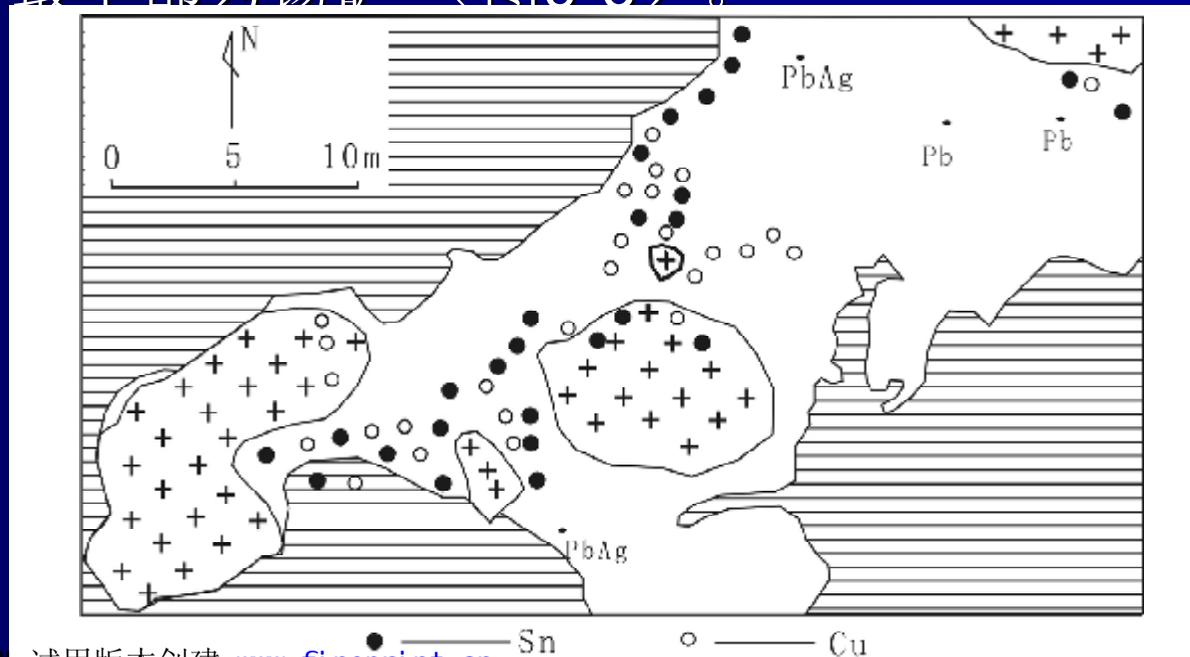
- 是指在较大范围的构造单元或构造岩浆活动带中，在成因上有联系的矿床或矿床类型在空间上的分带性。这种分带一般范围较大，以矿种或矿床类型作为分带指标。如秦岭造山带中心地段形成矽卡岩型铜钨矿床，向端部延展形成中低温热液铅锌矿床，再向外则逐渐变为汞矿床和锑矿床（图5-7）。



I. 分带规模等级

n (2) 矿田分带

- 是指在成因上有联系的矿床所组成的矿田中，具有不同矿化特征的矿床在空间上的分带性。如世界上研究历史最悠久，具有典型带状分布的英国康威尔地区的矿床，在水平方向上，自侵入体向外可依次划分出Sn、W、Bi、As、Cu、Zn、Pb和Sb各带，在垂直方向上，由上至下依次为菱铁矿-菱锰矿和辉锑矿，铅、锌、银矿；黑钨矿，最下部为锡矿（图5-8）。



1. 分带规模等级

n (2) 矿田分带

- 是指在成因上有联系的矿床所组成的矿田中，具有不同矿化特征的矿床在空间上的分带性。
 - n 再如我国著名的云南个旧锡矿田也具有明显的金属矿化分带现象。它以花岗岩体为中心，向外依次为：钨铍带→钨铜锡铋带→锡铜带→铅锌带，上述几种矿化在过渡地段存在叠加现象。

1. 分带规模等级

n (3) 矿床或矿体分带

- 是指沿水平和垂直方向上物质组分（元素、矿物、矿物组合）和矿石组构等在空间上作有规律的分布，如赣南钨矿床上部富钨、锡、铍，下部硫化物含量增加，深部常有铌、钽、稀土矿化；再如有的铅锌矿床的矿体，上部往往富含铅，中部含锌多，向下则铅锌减少而黄铁矿增多。

2. 分带样式

n 热液矿床的分带一般分为矿化的水平分带和垂直分带，有时也按照矿物组合形成的温度及其在空间的相对位置又可分为正向分带和逆向分带。

- 正向分带是指围绕某一矿化中心（或侵入体），具有高温矿物组合的矿床位于中心（或侵入体内外接触带附近），随着离矿化中心（或侵入体）的距离逐渐加大，依次出现具有较低温度矿物组合的矿床，如前所述的云南个旧地区和英国康威尔地区的分带均为顺向分带。
- 逆向分带则指较低温度条件下形成的矿物组合位于矿床或矿体下部，高温矿物组合则在上部，如赣南钨矿上部以锡石为主，中上部以黑钨矿为主（属高温矿物组合），下部则以辉钼矿、辉铋矿、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等硫化物为主（属中或中高温矿物组合）。

2. 分带样式

第八节

热液矿床的分带性

- n 从成矿元素的分布来看，许多矿床具有较普遍的分带规律，
 - 如页岩为寄主岩石的铜-硫化物矿床中，从矿化中心向外，存在Cu→Zn→Pb→Fe的水平分带；
 - 再如以沉积岩为容矿岩石的Pb-Zn块状硫化物矿床中，在水平方向上从内向外，垂直方向上从下往上，都存在Cu→Pb→Zn→(Ba)的分带规律。

3. 分带研究的意义

n 热液矿床的空间分带性研究不仅有助于认识矿床的成因和形成过程，而且可有效的指导矿床的勘查与评价，历来是热液矿床研究的重要内容之一。

— 第一，矿物或元素空间分带的识别，对矿产勘查具有重要的指导意义。区域分带会帮助优选勘探靶区；矿田、矿床或矿体的分带，有助于钻探等勘探工程的布置和施工以及对施工结果的评估

n 如美国的圣马纽埃铜矿是20世纪40年代末期发现的大型斑岩铜矿床，其矿石量为5.9亿吨。为了在该矿床周围寻找新的铜矿资源，1947~1948年曾在其西边打了7个钻孔，但都未见矿，因而放弃了找

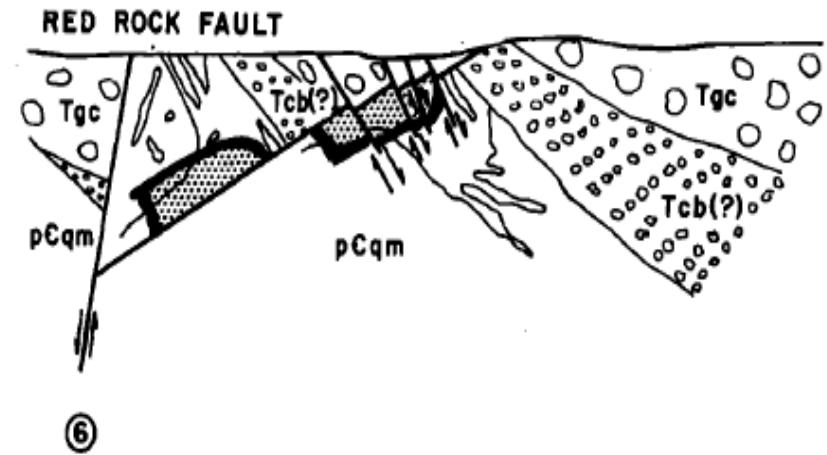
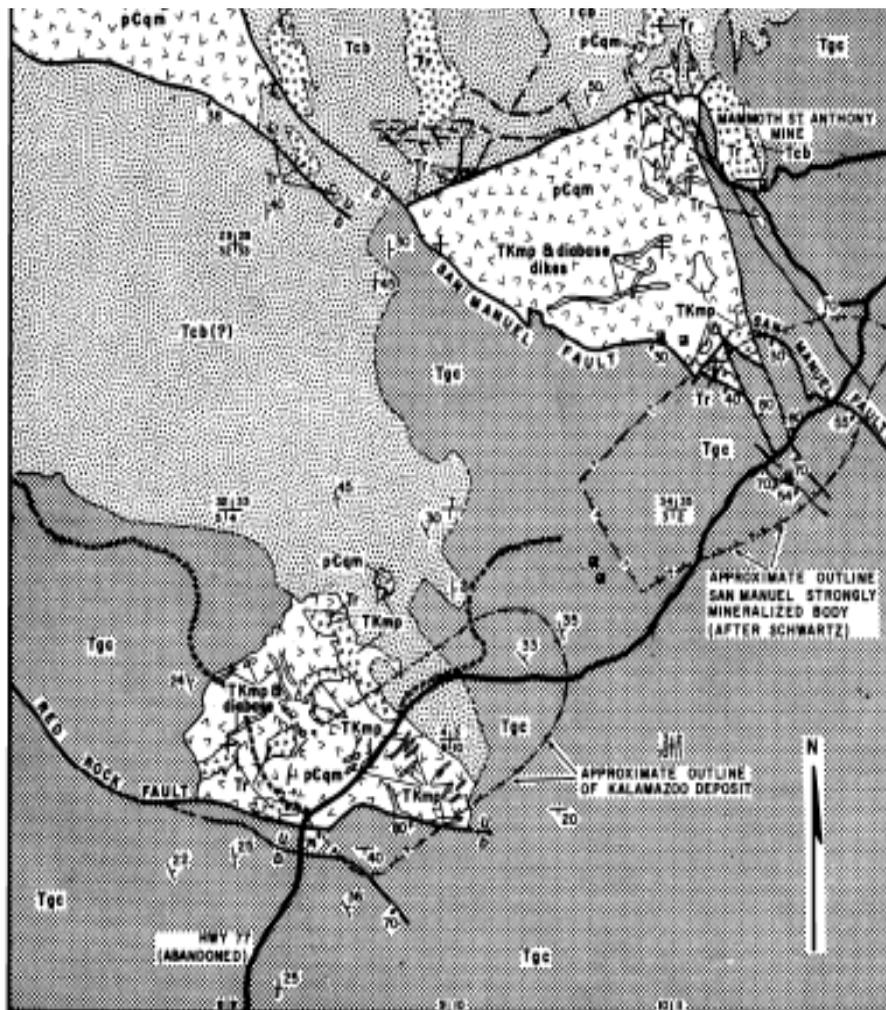
3. 分带研究的意义

热液矿床的空间分带性研究不仅有助于认识矿床的成因和形成过程，而且可有效的指导矿床的勘查与评价，历来是热液矿床研究的重要内容之一。

— 第一，矿物或元素空间分带的识别，对矿产勘查具有重要的指导意义。

n 对**圣马纽埃铜矿**蚀变矿化分带和控矿构造等进行了大量深入的研究，结合实验成果，认为该矿的**围岩蚀变有分带现象**。由内向外可分为钾化带，绢英岩化带、泥化带、青盘岩化带，矿化主要发育在绢英岩化带与钾化带之间，这种蚀变分带在空间上呈圆筒形对称结构，但该矿在平面上的蚀变分带却仅呈**半圆形**。

n 经研究，发现在该矿西南侧有一低角度的**正断层**，断层面面向南西倾，推测位于断层上盘（即西南侧）另一半圆形的蚀变矿体下滑至深部。经重新检查钻孔，发现已往的钻孔已打到边缘蚀变带，于是重新布置钻孔。1965年一举发现了另一半矿床即矿石量为**4.55亿吨的克拉马祖铜矿**。该矿床的发现显然**是利用矿化的分带规律指导找矿的成功范例**



6. High-angle normal fault displacements produced small offsets in the San Manuel orebody and a large displacement in the Red Rock fault west of the Kalamazoo orebody. Erosion exposed intrusive rocks and a corner of the San Manuel orebody and produced oxidation and limited chalcoite enrichment in the upper portion of the San Manuel

3. 分带研究的意义

热液矿床的空间分带性研究不仅有助于认识矿床的成因和形成过程，而且可有效的指导矿床的勘查与评价，历来是热液矿床研究的重要内容之一。

- 第二，与矿床有关的矿化分带的解释本身就是矿床成因研究的一部分。矿化分带能够帮助提供含矿流体成分演化和矿质沉淀条件变化的重要信息。正如有的矿床学家所指出的那样，无论一个矿床成因理论从多方面看多么具有吸引力，但如果解释不清所观察到的矿化分带的话，那么这种理论很难具有说服力。