维普资讯 http://www.cqvip.com

(上接 2007 年第 2 期：世界大洋代多金属硫化成矿作用)

成份。隋性气体多半分馏为气相，因而导致剩余液相中 He 浓度减少。因为已有罗加乔夫热液系统流体相态分离的证明，所以有根据地假设：正是这个过程引起成矿流体中氦(^4He) 同位素含量的变化。

Rainbow 构筑体硫化物中出现的$^3He/^4He$ 比值增高，与亚速尔海台区大西洋中脊上方水层中的比值增大是一致的，(Chin 等，1997)，对玄武岩所确定的情况相反，虽然也有微弱的趋势。很可能$^3He/^4He$ 在水层中的变化是由以北方向上热液活动性增大及水层中^3He 的贡献相应加大引起的。或许，这个趋势反映着流体相态分离的影响大过该区以北更浅水环境所特有的。

在罗加乔夫和 Rainbow 场硫化物的包体流体的$^3He/^4He$ 比值，与被认为是上地幔特征值的同位素$^3He/^4He$ 比值，可相对比：$(10 \pm 1) \times 10^{-6}$，(优势值为 $(7—11) \times 10^{-6}$)。表明来自上地幔的氦在成矿热液系统中起着相当大的贡献。

曾在胡安·德·富卡脊 Midr Beluy 矿场铁矿流体包体中测得 R/Ra 比值的最低值(4.4—6.9)，该处脊部覆盖有厚于 450cm 的夹浊积物和化学沉积物的沉积层。这些资料显示成矿系统中来自玄武岩的氦和来自超覆的浊积物夹层的氦的混合。

总之，氦同位素组成的研究结果均指明成矿流体中氦的变异，这是由不同来源的氦(海水和玄武岩，地幔去气) 的混合所致，或者是因流体相态分离引起的。

七、讨　论

上述研究表明，发生在世界大洋扩张带的现代成矿作用过程是相当复杂的和相当多样化的，远比早期这方面研究所得深入。大多数研究人员承认现代黄铁矿类生成于洋中脊拉张带内岩浆房上方，因活动的海底热液对流网络，海水顺着岩石中裂隙（通常是在玄武岩中，较少在安山岩、英安岩）渗到洋壳的深部层位。在内部裂谷中海水渗透的深度取决于近表面的岩浆房位置（距海底达 1.5—3.5km)。海水被逐渐加热直到近结晶温度（约 400℃)，水同周围的岩石发生强烈的相互作用。一部分海水组分（Mg^{++}、SO_4^{--}、K^+）和溶解氧进入到变化的火山岩新形成的矿物组成中。由于渗透反应，从岩石中析离出许多组分，特别是金属组分—铁、铜、锌、铅，以及硫$^{2-}$等，它们在流体中含量比海水高 $10^3—10^7$ 倍，致使流体酸度加大，pH 值达 3—4，代替海水的 7.8，通常它的盐度（3—6%$_{当量}$NaCl)，高于正常海水盐度（3.5$_{质量}$%$_{当量}$NaCl）几倍。这样形成的成矿流体因温度梯度和密度差异会沿着裂隙系统往上升并从海底流出。它同冷海水的混合引起金属硫化物、钙硫化物的快速沉积，而钡硫化物很少。

虽然个别热液场具有许多矿物地球化学特点，也曾确定热液场之间存在着明显差异。例如，同蛇纹岩组合的热液构筑体硫化物的硫同位素组成数据指示着它的成矿流体较之同玄武岩相互作用下产生的通常裂谷构筑体流体，硫同位素值 $\delta^{34}S$ 有很大变化。硫化物硫同位素组成的本质差异可能反映成矿作用物理化学条件（主要是 fo_2，pH 和 T）的变化，或者指示着在成矿作用过程中加入不同来源（具不同同位素比值）的硫。在同

维普资讯 http://www.cqvip.com

铁矿化物组合的铅锌矿中，铁含量有相当大的变化，证实这些矿物结晶时氧的活度有本质变异。因此，完全有可能造成硫化物硫同位素组成具很宽范围，其原因之一是成矿作用物理化学参量的演变。

Rainbow 成矿系统的特点是成矿流体中放射性同位素^{4}He的高含量。这或许与成矿流体形成于海水同相对年老的岩石相互作用有关。烃类气体主要组分（甲烷）的氦的外层同位素间的正相关可能指示着两者为同一源。可能，地幔的氦和甲烷在橄榄石蛇纹岩化条件下逸出。由于 Rainbow 矿场热液高温度溶液中的金属来源是大洋岩石圈下部层位的超基性岩，也可作证明。

罗加乔夫场硫化物的比大西洋中脊的其他热液场最富集铅放射性同位素^{206}Pb、^{207}Pb、^{208}Pb。在东太平洋海岭矿场中间，南纬 21°30′矿场恰恰相反，所有这些同位素份额都低于其他。罗加乔夫场氦同位素组成和形成硫化物的热液流体的$^{3}He/^{4}He$比值也独特，为最高值—$7.89 \sim 11.16 \times 10^{-6}$，这反映着成矿系统中地幔氦的显著贡献。从马努斯盆地硫化物中铅同位素组成可认为这些金属来源于洋中脊型玄武岩，但是，对玄武岩组合的硫化物构筑体来说，Pb、Ag、Sb 和 As 的高含量并不是典型的。由于马努斯盆地中未发现厚的沉积盖层，所以上述组分的来源应属埋藏在玄武岩覆盖层下的酸性岩。或者是吸入俯冲带的深海沉积物。根据该盆地火山岩中熔融包裹体的研究资料，酸性岩浆极富集金属。在远离岩浆源的残留流体被浓缩之同时，它们也被吸入到成矿系统中。

劳盆地北部的硫化物构筑体也形成于包含各种来源组分的流体。热液系统中加入重硫同位素的解释有多种多样。其中之一的可能机理是：从海水及其和炽热岩浆流体的硫化氢不均匀混合物中硫的硫酸盐还原。可以认为，各种成因硫的混合能作为同生矿物中引起同位素不平衡的原因之一。这种组分混合过程也发生在洋中脊的热液系统中。两种假说能用来说明劳盆地北部构筑体硫化物中铅放射性增高原因：1）金属来源于卷入俯冲过程的深海沉积物；2）这些地区地幔的非均一性，因此玄武岩和偏酸性岩浆分异物富集 EMII 组分（Bortrikov 等，1994）。

在洋中脊裂谷系的低速扩张带中，火山作用过程使构造活动持续期交替，因而热液过程主要发生在无岩浆幕期间。在该幕期间产生薄洋壳中的深断裂，促使海水渗透到断裂带最深处和上地幔，引起强烈的岩石次生演变过程。顺着大断裂或大洋裂谷的轴部裂缝，蛇纹岩化的超基性岩块体（密度低于基岩）以底辟形式挤压到地壳上部层位。侵入到洋壳上部层位的相对炽热的地幔质量引起等温线拱升，并促使形成对流的热液流，它从侧面吸收和加入海水循环。在持续进行的蛇纹岩化作用下散出相当数量的热量使得吸入的海水加热并维持对流网络的功能。蛇纹岩化过程发生在 350—500℃条件下。因之形成的流体有更高的温度，并有比洋中脊轴部近海底面岩浆房上方对流网络热液溶液更大的流体压力。与蛇纹岩化有关的热液系统具有一系列特点。在成矿系统中卷入镍和钴等组分。流体富含硫的重同位素和地幔的氦。成矿作用始源于非均质流体。在无岩浆幕的热液系统中的成矿流体显示更高的盐度，直到 $30_{质量}\%_{当量}$ NaCl。它们成分中也含有显著浓度的甲烷和其他烃类。

在与弧后盆地扩张中心共生的热液系统中，成矿作用过程较大洋中脊处复杂。矿石中稳定同位素和放射性同位素的比值证明不同来源的组分进入金属沉积物范围，并且局

维普资讯 http://www.cqvip.com

部因素明显地影响到铅、硫同位素组成。这些资料与在地壳中循环的海水从周围岩石吸取组分的假说并不矛盾，然而应该注意到成矿系统中岩浆成因流体的参与标志。同热液溶液中氧同位素组成硅化作用平衡的期望值与炽热海水渗透到海洋岩石圈深处并同周围岩层相互作用而形成流体的假说是一致的。因之，在弧后盆地如同在洋中脊扩张中心一样，形成块状硫化物矿的热液系统是对流网络，其内循环的海水转变为热的成矿流体。同时，这里流体相互作用的地段是与洋中脊带的情况有所不同的，从硫化矿地球化学特征（铅、硫同位素组成、铅、硫、砷、银的高含量）能预测：在成矿作用过程中有俯冲的沉积物料加入。对弧后盆地成矿过程起相当大作用是成矿流体的沸腾过程。它导致该环境（氧活性高和高酸度条件）下形成黄铁矿类矿，许多方面同高硫化物的低温热液矿床类似。

在进行研究过程中，查明热液构筑体的矿物组成，形成顺序和机理等的差异。矿石的许多矿物成分及其化学成分特征等受控于成矿流体的组成，而它首先决定于下伏岩石成份。早已查明，热液构筑体形成于各种不同的物理化学条件：其中有的是相对高温的，其他另一些是中温的。

我们来讨论导致矿物成份差异和矿物集合体沉积顺序性过程的普遍方向性及引起不同构筑体矿物中硫化学成分和同位素成分变异的问题。曾经确定：热液活动的起始阶段通常形成铁、锰结壳或厚达 20cm，主要是非金属矿物（自生硅和/或重晶石）组成的结壳。铁、锰氢氧化物结壳的广泛分布显示着流体的载荷发生在大面积、沿小裂隙。由于矿物沉积裂隙被填满。这就导致随后的成矿作用可能仅在沿断裂的热液流浓缩卸截地的上方。同时海底广大空间发育的铁锰沉积可作为遮盖层，阻碍着冷海水渗透进成矿系统的近表层部分，这就有可能使流体达到卸载带且不冷却不氧化。因此在形成硫化物构筑体的早期阶段，可能沉积磁黄铁矿。下一个成矿阶段显出另一种物理—化学条件。白铁矿的出现证明温度下降，低于 240℃，且包含在成矿流体中的硫化氢遭氧化。这现象的发生是由于海水沿遮盖壳小裂缝渗入成矿系统上部所致。流体增高的压力［因水下通道堵塞、破坏，当早先沉积的矿物（如硬石膏）溶解量减少］引起的水压裂时，这些小裂隙会出现。

热液丘进一步发展基本上是通过最上部前缘部分硫化物的一硫酸盐的矿石质体增长实现的，在烟囱中矿物优先沉积条件下，从烟囱中发生炽热流体的猛烈喷流（“黑烟囱”）。因此，每个烟囱都经历早期发育阶段（薄壁的硬石膏烟囱和硬石膏—硫化物烟囱），后被较成熟（区带的或块状的，直径达 10 多厘米的）烟囱所替代，由于轴心通道的充填就向外宽处增加，使烟囱内带以及下部的背面带（由于高出前缘）逐渐扩宽；还显示出：随着较大管状建筑体的形成而在附近分布许多小烟囱，这些建筑体有大的基础和一个或几个毗邻的主要通道，使流体急速地流出到周围的水层中。总之，烟囱向上增长，达到一米或更高。随着内部流体通道的修整程度，管状构筑体衰亡，而紧靠它生出越来越新的热液源，逐渐摒弃残余的烟囱。

成熟烟囱中通常出现同心状的分带性，显出较高的铜硫化物组合被从流体通道中心向构筑体边缘较低温的硫酸盐的替代。在烟囱的边缘部分常形成黄铁矿——白铁矿的矿物组合。这种交替反映成矿介质在垂直硫化物烟囱方向上的物理化学特征的变化，这与

维普资讯 http://www.cqvip.com

热的热液溶液与周围冷海水可逆的转移有关。

某些硫化物烟囱实际上完全由铜矿石组成。其中占优势的黄铜矿和等方黄铜矿组成宽宽的环通道的带。它们呈很好的结晶，从通道向烟囱边缘放射状分布。看来，它们是在通道壁上结晶的，在受约束条件下逐渐将通道填充满。某些烟囱中，该带的外部局部地被斑铜矿替代，向着通道方向增长，进而追踪到多孔的黄铜矿带（+方辉铜矿，铜蓝）。烟囱表面盖了一层较薄的铁氢氧化物矿物壳；它的形成至少一部分与硫化物矿物氧化无关。这些硫化物丘为最活动的从中央增长的典型的“铜”烟囱，看来，其形成在热液高温溶液最活跃的期间，溶液在冲淡时来不及大大的变冷。在热液丘根部和边缘的弱活动烟囱，往往很差地出现一个或几个不大的通道，通常由优势的闪锌矿（+黄铜矿+/-白铁矿+黄铁矿）构成。

个别小的硫化物构筑体的崩落，正如同大量相邻的烟囱连接在一起一样，会导致硫化物矿藏厚度逐渐加大。在热液丘内部，除了表面持续活动外，进一步发生原先形成的矿物集合体和残余空洞中新的金属沉积的重结晶作用和交化作用。对大型的长命的构筑物内部，Herzig 等（1998）以 TAG 构筑体为例作了最详细地研究，在其发育的成熟阶段可能发生连同石英角砾岩或硬石膏角砾岩发育一起的流体暴发现象。

许多构筑体早期的金属组合体是二硫化铁和闪锌矿。这证明溶液的最初组份表现出相对低的温度，而流体较酸性。白铁矿或白铁矿与黄铁矿的沉积发生在温度低于 240℃条件下。闪锌矿极低的含铁率指明较高的氧化性。早期聚合体矿物的胶状结构和树枝状析出是它们从过饱和溶液中沉积所致。这种情况也发生在炽热溶液与冷海水混合时。在随后阶段，当温度高于 240℃（缺失白铁矿）和存在温度梯度条件下。矿物沉积在早期形成的硫化物集合体构成的遮盖层下方。

早期矿物被后期矿物的交代反应起着大作用。年轻的硬石膏烟囱被硫化物集合体所替代。铜矿物替代锌硫化物（在闪锌矿中黄铜矿和等方黄铜矿受乳胶状浸染）的构造也属于这种表现，闪锌矿在金属集合体中是广泛发育的。对铜矿来说，典型的是存在晶格连生（形成等方黄铜矿中黄铜矿层片状微晶），它发生在高温的库班造山期分解作用下（“中性的固态溶液”）。黄铜矿带（黄铜矿+等方黄铜矿）外部被斑铜矿所替代，而斑铜矿带外部低铁的铜硫化物—辉铜矿、铜蓝等替代；自由铁基本上进入接近外部氢氧化铁结壳的成分。

总之，矿化集合体和构筑体在生长次序性和形成机理上的差异与高温热液溶液同冷海水混合速率的改变有关，同样地，它决定于局部流体动力学条件。

陈邦彦 译自俄刊《金属矿床地质学》2005 年 47 卷 1 期 16—50 页

作者简介：陈邦彦，男，1939 生，从事海洋地球物理勘查研究，教授级高工。联系地址：广州环市东路 477 号，广州海洋地质调查局。邮编：510075