

文章编号: 1009-3850(2006)03-0109-04

世界大型斑岩矿床

世界上 25 个已知的最大斑岩铜矿床中,半数以上形成于新生代的古—始新世、始—渐新世、中新世中期—上新世 3 个时期,且集中于智利中、北部和美国亚利桑那州西南—墨西哥北部 3 个地区。美国蒙大拿州和犹他州、巴拿马、秘鲁、阿根廷、印尼伊里安查亚、蒙古、伊朗也是重要的斑岩矿床产地。几个最大的矿床体系与高钾钙碱性侵入体有关,但最有利于大型斑岩铜矿床形成的却是钙碱性岩浆。

25 个富金斑岩矿床集中于太平洋西南部和南美洲,以及欧亚大陆、加拿大不列颠哥伦比亚省、美国阿拉斯加州和澳大利亚新南威尔士州。许多矿床形成于 13Ma。最大的矿床与高钾钙碱性侵入体有关,但许多矿床则产出钙碱性斑状侵入体。

过去 20Ma 以来,环太平洋地区大型斑岩铜-钼、铜-金矿床的形成与洋岛和陆弧下无震洋脊、海山链和洋底高原的俯冲密切相关。

1 先期地质构造的作用

巴布亚新几内亚和智利北部及中部与斑岩有关的大型铜和/或金矿床形成于第三纪拉张构造环境岩浆作用期间。早期构造环境在巴布亚新几内亚为中生代被动边缘,在智利北部为侏罗—白垩纪弧后盆地,在智利中部为渐新世弧内盆地,其基底岩石、断层体系和地层组合的先期地质构造在控制大型矿床的发育中起着重要作用。第三纪碰撞期间,深挤离的铲状断层发生倒转,强烈隆升、剥露,并伴有超压引起的破裂和流体流;陡倾的横推断层活化后形成平搓断层,并伴有陡而深的与扩张面、挠曲或断层交错有关的岩浆和/或流体通道;矿床通常形成于逆冲断层的上盘。在与碰撞有关的挤压作用下,平缓地层组合的强单元形成了上覆于下部被挤离断层或其它断层面所分隔的褶皱弱单元的地层板块,如巴布亚新几内亚的 Darai Mendi 灰岩或同期地层以及智利中部 Farellones 组的熔岩,在岩浆和/或流体体系之上形成一个顶盖,阻碍着岩浆的上升,为岩浆和岩浆热液流体的聚集提供了理想的场所。

根据上述实例,建立了圈定大型斑岩铜体系远景区的一套勘查标志:(1)迁移到先期拉张构造内的岩浆弧;(2)深挤离的铲状同沉积断层和陡倾的横推断层的耦合体系;(3)可能会形成区域应力场扰动的刚性基底地块;(4)褶皱带,其具有相对未变形或缓褶皱的大型(50km宽)强地层板块,覆于十分复杂的褶皱断裂地层层序之上。与斑岩有关的矿床很可能形成于或靠近强地层板块的底部。

2 智利北部 Rosario 铜-钼-金矿床

Rosario 铜-钼-金矿床位于智利北部 Collahuasi 地区,含高品位铜-银-(金)的浅成低温矿脉产于斑岩铜-钼矿体之中。其储量的 95% 以上为深成矿,而相邻的 Ujina 和 Quebrada Blanca 矿床则以浅成硫化物矿石为主。矿化脉赋存于下二叠统火山沉积岩、下三叠统花岗闪长岩和晚始新世斑状石英二长岩内。高品位铜-银-(金)矿脉产于南西倾斜的 Rosario 断层系内。

该矿床热液蚀变作用的特点是以 Rosario 斑岩内的 K 长石为核心,向外过渡为次生黑云母-钠长石-磁铁矿组合。准同生关系表明,最早期的蚀变产物是磁铁矿,但已被黑云母-钠长石交代;矿脉的穿插关系表明,K 长石形成于黑云母-钠长石蚀变期间和之后。黄铜矿和斑铜矿沉淀于与 K 长石和黑云母-钠长石组合伴生的石英脉中。早期热液流体为超盐度卤水,早期 K、Na 硅酸盐组合内弱矿化的伊利石-绿泥石(中级泥质)蚀变系中温、中盐度卤水所致。辉钼矿沉淀于钾蚀变和中级泥质蚀变事件期间形成的石英脉中。

斑岩型矿石和蚀变矿物被构造控制的石英-明矾石-黄铁矿、叶腊石-地开石和白云母-石英(绢英化)蚀变组合所叠加。白云母-石英-黄铁矿蚀变岩类向上呈喇叭形地带,环绕在受断层控制的高级泥质蚀变域四周。

压力-深度估测值显示,该矿床 K、Na 硅酸盐组合和高级泥质蚀变组合形成期间,至少有 1km 的岩

石遭受侵蚀。侵蚀作用发生于1.8Ma, 速率很快。斑岩侵位时, 重力滑动可能使剥露速率加快, 有助于在Rosario斑岩上形成高硫化环境。

导致Rosario斑岩铜矿化的热液系统在高硫化矿石蚀变组合形成之前就已部分剥露地表, 这意味着在Rosario高硫化矿脉体系之下某处发生过第二次潜侵位, 这点已为区域断层的几何形态以及贵金属和硫酸盐的分带所证实。

3 阿根廷西北 Bajo de la Alumbrera 铜-金矿床

Bajo de la Alumbrera 斑岩铜矿床的蚀变带集中在几个斑岩体内。这些蚀变带从中心的铜-铁硫化物和金矿化的钾质(黑云母-K长石-石英)核心带向外过渡为绿磐岩(绿泥石-伊利石-绿帘石-方解石)组合带。矿化的中泥质蚀变组合(绿泥石-伊利石±黄铁矿)形成于该矿床顶部和侧翼的钾质蚀变带内, 并向外过渡为绢英化(石英-白云母-伊利石±黄铁矿)蚀变。流体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 D 值(分别为 8.3‰ ~ 10.2‰ 和 -33‰ ~ -81‰)证实最早期的钾质蚀变为初始岩浆成因。低温钾质蚀变发生于 D 值较低(低达 -123‰)的岩浆流体。这些亏损组成与大气水迥然不同, 而与来源于下伏岩浆的岩浆流体的脱气和挥发组分的出溶相吻合。根据相分离(或沸腾)对与钾质蚀变有关的流体的计算组成的变化进行了解释。如果铜铁硫化物沉积于冷却期, 则这种冷却多半是相分离的结果。

岩浆水与矿床上覆中级泥质蚀变组合的形成直接相关。与该蚀变伴生的流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 D 值分别为 4.8‰ ~ 8.1‰ 和 -31‰ ~ -71‰ 。与绢英化蚀变伴生的流体的组成(分别为 -0.8‰ ~ 10.2‰ 和 -31‰ ~ -119‰)与中级泥质蚀变组合的值部分重叠。由此推断绢英化蚀变组合形成于下列两个阶段:(1)含D亏损水的高温阶段, 可能形成于岩浆脱气和/或新的岩浆水注入成分不同的热液体系内;(2)低温绢英化蚀变阶段, 模拟同位素组成的变化表明流体为岩浆水和大气水的混合。其后热液体系演化期间的成矿作用可能与岩浆流体的进一步冷却有关, 部分系液-岩相互作用和相分离的结果, pH值和/或氧逸度的变化也可引起成矿作用。

4 智利中部大型斑岩铜-钼矿床

智利中部的大型斑岩铜-钼矿床产于白垩系—上新统火山岩厚层层序中。白垩系Las Chilcas组以

钙碱性为主的玄武安山岩 La/Sm 比值为 $1.8\sim 2.5$, Sm/Ybn 比值为 $1.8\sim 2.8$ 。渐新统一中新统Abanico组为玄武岩到流纹岩, 向南总体过渡为钙碱性到拉斑玄武岩类。该组所有的样品均LREE富集、HREE中等或局部高度分馏($\text{La}/\text{Sm}=1.3\sim 1.41$, $\text{Sm}/\text{Ybn}=1.5\sim 1.58$)。中中新统Salamanca组玄武安山岩和安山岩的REE地球化学与上白垩统相似($\text{La}/\text{Sm}=1.5\sim 2.7$, $\text{Sm}/\text{Ybn}=1.6\sim 2.7$)。上覆中中新统Farellones组岩性从拉斑玄武岩类到钙碱性岩类以及从玄武岩到安山岩, LREE富集和HREE分馏程度均相似($\text{La}/\text{Sm}=1.7\sim 2.5$, $\text{Sm}/\text{Ybn}=1.7\sim 3.3$)。而上新统La Copa Rhyolite杂岩则LREE高度富集、HREE强烈亏损($\text{La}/\text{Sm}=3.8\sim 3.9$, $\text{Sm}/\text{Ybn}=4.2\sim 4.7$)。这些火山岩LREE富集、Nb负异常的特点, 与弧环境吻合, 大多数元素的丰度差异很小。智利中部中新世时期地壳变厚导致矿物成分从角闪石为主过渡到以石榴子石为主的残余矿物, 从而使能形成大型斑岩铜矿床的流体释放出来。在Farellones组喷发末期和具较高 La/Yb 比值的La Copa Rhyolite杂岩喷发期间地球化学特征的迅速变化反映了构造环境的巨变, 尽管Farellones组的 ΣNd 值较低意味着较年青的岩套中地壳混染起着较大的作用。在地壳没有变厚的情况下, Juan Fernandez脊的俯冲可能加剧了地壳内的断裂作用, 甚至提供金属来源, 因而在大型斑岩铜矿床的形成中成为关键性的地球动力作用。

智利中部Rio Blanco-Los Bronces斑岩铜-钼矿床矿床部分赋存于年龄为 $16.77\pm 0.25\sim 17.20\pm 0.05$ (2 σ)Ma的Farellones组安山岩质火山岩中, 但大部分容矿岩为San Francisco岩基的单元, 包括 11.96 ± 0.40 Ma的Rio Blanco花岗闪长岩、 8.40 ± 0.23 Ma的Cascada花岗闪长岩和 8.16 ± 0.45 Ma的闪长岩。侵入到该岩基内的浅成英安岩侵入体(晚期斑岩)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -TIMS年龄范围为 6.32 ± 0.09 Ma(石英二长斑岩)、 5.84 ± 0.03 Ma(长石斑岩)、到 5.23 ± 0.07 Ma(Don Luis斑岩);晚期矿化的Rio Blanco英安岩岩颈的SHRIMP锆石年龄为 4.92 ± 0.09 Ma。石英二长斑岩、长石斑岩和Don Luis斑岩以及成矿前的闪长岩中斑晶黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄仅为 $5.12\pm 0.07\sim 4.57\pm 0.06$ Ma, 均比相应的锆石年青得多, 而与侵入层序无关。San Francisco岩基单元内的热液黑云母和正长石脉的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $5.32\pm 0.27\sim 4.59\pm 0.11$ Ma。热液绢云母(白云母)为黄铜矿的一种伴生矿物, 其点熔融年龄为 4.40 ± 0.15 Ma(Rio

Blanco 花岗岩) 和 $4.37 \pm 0.06\text{Ma}$ (Don Luis 斑岩)。ID-TIMS 和 SHRIMP 锆石年龄的对比表明, 大多数的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄, 甚至 95% 的坪年龄均不代表初始岩浆冷却或热液蚀变-矿化作用的年龄。两个辉钼矿样品的 Re-Os 年龄为 $5.4 \sim 6.3\text{Ma}$, 与晚期斑岩的锆石 U-Pb 年龄基本一致。这意味着铜-钼的成矿作用时代至少与晚期斑岩岩套中石英二长斑岩单元侵位时代基本一致, 因而与英安岩熔融体上升到次火山岩层位的过程同期。推断热液活动一直持续到 $4.37 \pm 0.06\text{Ma}$, 随后是 Don Luis 斑岩的侵入和 Rio Blanco 英安岩岩颈的形成。因此, 铜-钼的深成成矿作用可能持续了 2Ma。

Sur-Sur 电气石角砾岩位于该铜-钼矿床东南部, 占铜总资源量的近 $1/4$ 。该角砾岩产于侵入中新世火山-火山碎屑岩的 San Francisco 岩基的花岗闪长岩 ($12 \sim 8\text{Ma}$) 内, 并被一套弱矿化一无矿的长英质斑岩所切割, 表明角砾岩的最小矿化年龄约为 6Ma。角砾岩墙至少长 3km、宽 0.2km, 垂向范围至少 1km。其在深处被早期黑云母和硬石膏胶结, 在较高处被电气石和镜铁矿胶结。这些早期形成的胶结物均已次生加大, 并部分被黄铜矿、磁铁矿、黄铁矿和石英交代。角砾岩内的矿物分带表现为从黑云母及黑云母蚀变, 向上过渡为电气石胶结物及石英-绢云母-电气石蚀变。铁氧化物矿物也呈现分带, 从磁铁矿为主, 向上过渡为镜铁矿为主, 再上黄铁矿成为主要硫化物。次生富含液体和气体并具超盐度的流体包裹体保存于石英和电气石胶结物中。硫化物胶结物的硫同位素组成为 $-4.1\text{‰} \sim -2.7\text{‰}$ 。样品中 $\delta^{34}\text{S}$ 最低值出现电气石角砾岩中最高铜品位的产出位置, 该地带含大量镜铁矿(局部被磁铁矿交代)。Sur-Sur 电气石角砾岩和 Rio Blanco 岩浆角砾岩中硬石膏胶结物内铅的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $17.558 \sim 18.479$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $15.534 \sim 15.623$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $37.341 \sim 38.412$ 。硬石膏中的铅较之该铜-钼矿床硫化物矿石和火成岩主岩内的铅, 放射性低得多。硬石膏中的铅必定来源于主岩浆-热液系统外部的岩石, 多半是前科迪勒拉基底。来自深部结晶侵入作用的岩浆-热液爆发在 Sur-Sur 诱发了角砾岩的形成。流体静压力大大超过封闭的花岗闪长岩的岩石载荷及抗张强度, 导致广泛的角砾岩化, 继而侵入大量岩浆气体和超盐度卤水。低密度气相(携带 H_2O 、 SO_2 、 HCl 和 B_2O_3) 的物理特征与含铜卤水有别, 其首先通过角砾岩柱渗入并凝聚进入来源不明的地下水。硬石膏、镜铁矿和电气石均沉淀自这种低盐度酸性氧化混合

溶液, 然后岩浆-热液卤水上升, 导致硫化物沉淀。氧化的酸性水与含铜岩浆-热液卤水混合, 导致高品位铜的沉淀。

Rio Blanco 铜-钼矿床成矿晚期和成矿期后的流纹岩单元内未经蚀变的熔融包裹体, 证实存在一种富挥发份的熔融体, 其自最初为熔融体+蒸汽气泡乳化液的一种富挥发份的含水相出溶, 乳化液爆裂进入熔融体和初始岩浆流体。金属隐蔽于出溶的挥发份相内, 并来源于上述可能的成矿热液流体。相邻的同源岩浆侵入体, 其熔融包裹体的差异可能与各矿体的矿化程度直接有关, 如 Rio Blanco 矿床某个成矿后流纹岩岩体, 其熔融包裹体虽然为富挥发份相, 但却几乎没有富金属蒸汽捕获的证据。相反, 相邻的成矿晚期流纹岩岩体中的包裹体也为挥发份相, 但却有证据证明富金属热液流体是在冷却的最后阶段蓄积的。

智利中部 El Teniente 斑岩铜-钼矿床为世界著名的最大斑岩铜矿床, 其各期成矿作用与中新世末—上新世初的长英质侵入活动时空关系密切, 大部分铜均侵位于晚岩浆期 ($5.9 \sim 4.9\text{Ma}$), 与英安斑岩岩墙和英安岩岩筒侵入镁铁质中性岩床-岩株杂岩的时代同期。岩浆晚期的成矿作用主要发生于与英安岩的钾长石蚀变和镁铁质侵入体组合的 Na-K 长石蚀变、黑云母蚀变和绿帘岩蚀变伴生的石英-硬石膏为主的网状脉内, 同时还形成铜矿化弱的热液黑云母胶结角砾岩。之后为两个矿化绢云母蚀变期, 即主热液期 ($4.9 \sim 4.8\text{Ma}$), 和晚热液期 ($4.8 \sim 4.4\text{Ma}$), 形成厚大的富铜矿脉。晚岩浆期和主热液期矿脉以 Braden 角砾岩岩筒为核心呈同心放射状分布。大多数同心矿脉为缓倾斜的, 而放射状矿脉则近于垂直。矿脉的分布受深部大型岩浆房侵入后形成的局部应力状态控制, 岩浆房系英安岩即 Braden 角砾岩岩筒的来源, 最终导致铜-钼矿化。晚热液期矿脉从边缘向内陡倾, 环绕 Braden 角砾岩岩筒呈同心状。与晚岩浆期和主热液期相反, 在由于侵入作用引起的应力释放造成的沉降期, 放射状矿脉和缓倾斜的同心状矿脉十分稀少。岩浆房的活化反过来又使同心状构造活化, 形成岩浆和/或液体压力, 导致爆破角砾岩化和液化。

5 印度尼西亚巴布亚的铜-金矿床

Grasberg 火成杂岩内岩浆白云母和热液白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $3.33 \pm 0.12 \sim 3.01 \pm 0.06\text{Ma}$ 。侵入岩的年龄和侵入岩与热液蚀变和成矿作用之间的准

同生关系表明, Grasberg 火成杂岩的形成经历了若干个侵入-热液蚀变旋回, 包括 Dalam-Grasberg 侵入-蚀变主旋回 ($3.33 \pm 0.2 \sim 3.19 \pm 0.05 \text{Ma}$)、Kali 侵入-蚀变旋回 ($3.16 \pm 0.06 \sim 3.06 \pm 0.03 \text{Ma}$)、Kali 侵入后和 Grasberg 矿化旋回 ($3.06 \pm 0.03 \sim 3.01 \pm 0.06 \text{Ma}$)。

相邻的 Kucing Liar 铜-钼矿床的金云母样品, 其测定的磁铁矿年龄为 $3.41 \pm 0.03 \text{Ma}$, 在 Grasberg 火成杂岩内 Dalam 侵入体的年龄范围内, 表明其钙硅酸盐夕卡岩部分形成于该杂岩发育的早期阶段。Ertsberg 侵入体内等粒状闪长岩 ($2.67 \pm 0.03 \text{Ma}$)、侵入体内夕卡岩岩脉内的金云母 ($2.71 \pm 0.04 \text{Ma}$) 和 Grasberg 铜-金矿床中的金云母 ($2.59 \pm 0.15 \text{Ma}$) 的年龄值表明, Grasberg 矿床的侵入、蚀变和成矿作用早于 Grasberg 火成杂岩的侵入和成矿作用。形成 Grasberg 火成杂岩和 Ertsberg 铜-金矿床的侵入作用和导致大规模蚀变和成矿作用的热液流体似乎来源于更深处的岩浆房。基性岩浆可能也为 Grasberg 地区的铜-金矿床提供流体、金属或硫等成矿物质。

Ertsberg 地区产出多种夕卡岩型矿床和与斑岩有关的矿床, 包括一个拥有世界最大规模铜-金资源量的矿床。Big Gossan 早期的夕卡岩型铜-金矿床沿走向延伸 2km 到北西的 Wanagon 金矿床, 被含 Bi 和 Te 矿物的各种晚期黄铁矿、闪锌矿、砷黄铁矿(毒砂)和自然金叠加。Big Gossan 金矿床金云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄不足 $2.82 \pm 0.04 \text{Ma}$, 而 Wanagon 金矿床 K 长

石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $3.62 \pm 0.045 \text{Ma}$ 。Wanagon 岩床的 K-Ar 年龄值 ($3.81 \pm 0.06 \text{Ma}$) 将上覆夕卡岩型铜-金矿床和晚期 Wanagon 金矿床的形成时间局限在约 0.2Ma。

Big Gossan 金矿床早期夕卡岩型铜-金矿化呈矿物学、化学和温度三维分带: 高温核 (Zn/Cu 比值低) 向北西尖灭, 并在深处开放; 上覆黄铁矿-Au-As-Zn-Bi-Te 组合的最高铜品位和最大规模产于北西与北东向的断层的接合部; 该组合也见于矿床以北和以南的断层和断裂带内。在 Wanagon 金矿床, 夕卡岩和砂岩的淋滤作用发生于黄铁矿-Au-As-Zn-Bi-Te 组合进入之前。在砂岩内, 该组合的矿化作用伴有 K 长石(冰长石)和少量石英脉的产出。而碳酸盐岩内未见淋滤或次生 K 长石, 但硫化物却与石英及白云石脉相伴产出。上述铜-金和上覆组合硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-0.7\% \sim -5.1\%$ 。上覆组合的矿物成分包括自然金、银黝铜矿和砷黝铜矿。Bi、Te-Ag-Au 矿物包括斜方辉铋铅矿、辉铋矿、碲金银矿、碲银矿、碲铅矿和辉碲铋矿。在 Big Gossan 金矿床, 稳定同位素研究显示包裹体的流体为岩浆。上述组合形成于具不同组分的流体, 可能是常见于低-高硫化作用的浅成热液矿床的流体的岩浆母体。这类矿床形成的深度较浅, 并含大量的非岩浆水(即大气水)。

(王承书编译自《Economic Geology》, 2005, Vol. 100, No. 5: “大型斑岩矿床”专辑)