

经济地质

80 卷第七期

美国

ECONOMIC GEOLOGY

and

the Bulletin of the Society of Economic Geologists

1985

(十一月)

地 质 出 版 社

目 录

澳大利亚南部Kanmantoo群中的贱金属矿化：区域的同位素研究

.....P. K. Seccombe, P. G. Spry, R. A. Both, M. T. Jones, J. C. Schiller (1)

施瓦茨瓦尔德铀矿床 (1)：地质和构造控矿A. R. Wallace, R. C. Karlson (16)

施瓦茨瓦尔德铀矿床 (2)：铀矿化的年龄和其成因的铅同位素条件

.....K. R. Ludwig, A. R. Wallace, K. R. Simmons (29)

加拿大萨斯喀彻温省Karpinka湖铀矿远景——可能的变质中前寒武纪砂岩型铀矿床

.....A. E. Williams-Jones, M. J. Sawiuk (42)

澳大利亚西部太古代Yilgarn地块Teutonic Bore块状硫化物矿床的地质环境

.....J. A. Hallberg, J. F. H. Thompson (54)

内华达州Mcdermitt汞矿蛋白石角砾岩的成因.....M. J. Netherington, E. S. Cheney (64)

印度安得拉邦Veligallu片岩带中的金-白钨矿矿化作用

.....J. B. de Smeth, K. S. P. Rao, R. D. Schuiling (70)

蛇绿岩杂岩的碳酸盐化超镁铁质岩石中的金.....Gerard Buisson, Marc Leblanc (75)

澳大利亚南部Kanmantoo群中的 贱金属矿化：区域的同位素研究

P. K. Seccombe P. G. Spry R. A. Bott
M. T. Jones J. C. Schiller

摘 要

一些贱金属硫化物矿床位于南澳大利亚Kanmantoo群中多次变形的变杂砂岩中, 硫化物矿化有三种主要的类型: (1) 铜矿床, 包括Kanmantoo和Bremer矿山, South Hill探区和几个次要的产地; (2) Aclare, Wheal Ellen和Strathalbyn矿山的铅-锌矿床; (3) Kanmantoo群中的Nairne黄铁矿矿床和其他的黄铁片岩的黄铁矿-磁黄铁矿化。

铜矿床是不整合的和筒状的, 其中主要的不透明矿物为黄铜矿、磁黄铁矿、磁铁矿和黄铁矿。铅-锌矿床不含磁铁矿, 并且显然是整合的。层状的含黄铁片岩的整个厚度为100m, 延长达32km。

Kanmantoo矿山富矿体中的硫同位素比值, 除一个样品外, 为3.5—12.4‰, 平均为 8.0 ± 2.3 ‰, 各个富矿体的平均值相差多达4‰。在Kanmantoo的一些低品位硫化物矿体($\delta^{34}\text{S} = 16$ ‰)和主矿体表生黄铁矿($\delta^{34}\text{S} = 39.6$ ‰)之间 ^{34}S 的富集是显著的。较小的铜矿床和铅-锌矿床在硫同位素的组成上都显示了相似性。它们的硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 的范围为-4.7—6.5‰, 平均值接近0‰。黄铁片岩都强烈的贫 ^{34}S , 并且含有在缺氧海洋环境中生成的生物硫; 各个硫化物范围为-19.9—11.9‰, 尽管经受了后来的角闪石相的变质作用(3.8kb和500—600℃), 但许多矿床的共生硫化物对同位素的不平衡仍是它们的特征。Wheal Ellen矿山中的闪锌矿-方铅矿对得出了一致的计算温度(379℃), 可能在低于变质峰值时就已经重新平衡了。

贱金属矿化是由沉积盆地内3—4m以上的深处排出的或者循环到此深度的热液流体的地下(Cu)和海底(Pb-Zn)堆集而成的。流体排出的最小深度的估计与位于贱金属矿化层位之下的黄铁片岩所占据的地层范围相一致。硫同位素证据表明, 硫是由热液淋滤黄铁片岩形成的。贱金属矿化中的硫显示了寒武纪海水和生物(含黄铁片岩)两种混合的来源。而两种形式硫的混合比例的不同是引起区内Kanmantoo矿山和各个矿床中透镜状矿体之间的差异的原因。

前 言

一些贱金属硫化物矿床产于Mount Lofty山脉东南翼多次变形的Kanmantoo群的寒武纪片岩中, 山脉位于Kanmantoo和Strathalbyn之间, Adelaide东南50 km(图1)。

硫化物矿化有三种主要类型: (1) 铜矿床, 包括Kanmantoo和Bremer矿山, South Hill探区和几个分散的次要产地; (2) 铅-锌矿产于Aclare, Wheal Ellen, Strathalbyn, Scott's Creek和Glenalbyn矿山中; (3) 黄铁矿-磁铁矿矿化产在Kanmantoo群中的Nairne黄铁矿矿床和其他黄铁片岩中。

一些学者对Kanmantoo群中矿化的成因已提出了极不相同的看法。Thomson (1975) 曾认为许多矿化是区域变质作用的晚期产物, 并且强调主要线型构造控矿的重要性。但是Verwoerd和Clegghorn (1975) 假

定主要的Kanmantoo铜矿床为同沉积成因, 而Jensen和Whittle (1969) 根据硫同位素资料主张Nairne黄铁矿矿床为细菌成因的硫源和硫化物为沉积成因。

本文将研究Kanmantoo群中所有三种类型的硫化物, 重点放在铜和铅-锌矿床上, 即: Kanmantoo, Bremer, South Hill, Aclare, Wheal Ellen和Strathalbyn, Spry (1976) 对该地的区域岩石和构造的研究形成了硫同位素研究的基础。Lindqvist (1969) 和J. C. Schiller 提供了Kanmantoo矿体的附加的构造细节。Jensen和Whittle (1969) 对Nairne黄铁矿矿床提供了补充资料, 有关Scott's Creek和Glenalbyn矿山的资料比较缺乏, 因此本文不包括这些矿床的内容。

通过确定: (1) 在矿床里和矿床之间的硫同位素的分布, (2) 变质作用对硫化物组合的影响, (3) 矿液的来源和可能的性质, (4) 相似经济矿物的矿床之间和不同矿化类型之间(若有的话)的成因联系,

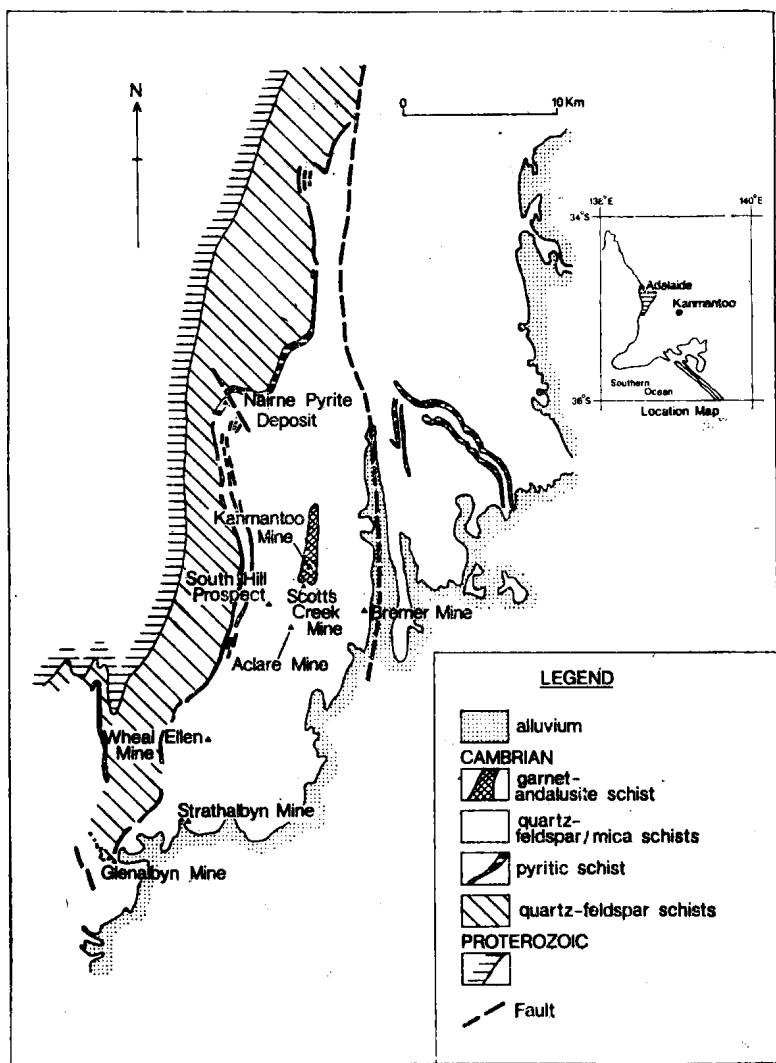


图1 标明与本文有关的矿床位置的南澳大利亚Kanmantoo群的区域地质图

(5) 贱金属矿床形成中 Nairne Pyrite Member 的重要性或相反没有意义, 硫同位素的研究可被用来检验 Kanmantoo 群中有关矿石成因的不同观点。

区域地质

Kanmantoo 群包括寒武纪厚而连续的区域变质泥质岩和杂砂岩 (Sprigg 和 Campana, 1953) 和其上覆的晚元古代 Adelaide 系的变质泥质岩、石英岩和少量碳酸盐岩石 (Daily 和 Milnes, 1972), 如图 1 所示。在 Kanmantoo 群中还没有发现火山岩类岩石 (Thomson, 1975)。

除 Nairne 黄铁矿矿床外, 所有的矿化区位于 Daily 和 Milnes (1972) 建立的 Inman Hill 亚群的 Tapanappa 组的上部。Nairne 黄铁矿矿床产于下伏的钙质粉砂岩

中, 而且一些学者把其作为特别富含沉积硫化物地层组的例子。Nairne 黄铁矿矿床在层位上可能在 Tapanappa 组贱金属矿化之下达 3—4 km (Daily 和 Milnes, 1972)。

变质作用是低压中间类型 (Offler 和 Fleming, 1968), 并且在研究区内, Kanmantoo 群的岩层可能为角闪岩相区域变质作用所形成的。已计算出变质作用时达到的最大压力和温度大约为 3.8 kb 和 500°—600°C (Offler 和 Fleming, 1968, Spry, 1976, Manktelow, 1979)。云母-石榴石-红柱石和石英-长石片岩是主要的岩石类型, 其伴有少量的黄铁矿和钙质-硅酸盐片岩。

寒武-奥陶的 Delamerian 造山运动期间的塑性变形至少引起了三幕区域性褶皱 (Offler 和 Fleming,

1968, Spry, 1976)。

矿 化

这次研究对于七个矿化地区都进行了采样，其中每一个地区的地质概况在本节中将给以阐述。其位置都表示于图 1 中，主要地质细节列于表 1。

铜矿床

Kanmantoo 矿床，在 1976 年矿山关闭以前，Kanmantoo 铜矿床生产了 4.05Mt 矿石，其中铜的平均品位约为 1%，仍有平均含 Cu 1.1% 的 8Mt 以上的矿石留在露天采场的下面。

Kanmantoo 矿床是产于石榴石-红柱石-黑云母片岩层位南部一组相似矿床中最大的一个（图 1）。这种岩石的特征是大的红柱石变斑晶位于石英、黑云母、石榴石和十字石片状基质中。石英-云母片岩位于石榴石-红柱石-黑云母片岩层位的东、西两侧，它是 Kanmantoo 群的代表性岩石，主要由石英、白云母、黑云母和斜长石组成。在 Kanmantoo 矿山地区石英-云母片岩不含有经济价值的矿化。

虽然 Kanmantoo 矿床在形状上是复杂的，但总的说来是一个筒状体，其最大水平面积为 120 × 180m

(Verwoerd 和 Cleghorn, 1975)。再详细点说，矿床是由许多硫化物透镜体组成，大多数平行于周围岩石的片理。筒状体的轴也位于向北陡倾斜的片理面中。

硫化物矿化在石榴石-红柱石-黑云母片岩层位中是层控的，产于绿泥石片岩和不同矿物的含脉片岩中。含脉片岩中最常见的矿物组合是石英-绿泥石-石榴石 ± 磁黄铁矿 ± 黄铜矿。其他的一些常见组合有：石英-绿泥石-石榴石-黑云母 ± 磁黄铁矿 ± 黄铜矿，十字石-黑云母-石榴石 ± 磁黄铁矿 ± 黄铜矿，十字石-黑云母-石榴石-绿泥石 ± 磁黄铁矿 ± 黄铜矿和十字石-绿泥石-磁铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿。含脉片岩与其周围片岩的不同之处是红柱石很少见。不透明矿物浸染于整个含脉片岩中，并且还呈细脉和较窄的条带平行或不平行于片理。磁铁矿和黄铁矿是矿石的重要组成部分，可能含有 10% 的不透明矿物。次要不透明相有：钛铁矿、方黄铁矿、镍黄铁矿、白铁矿、马基诺矿、闪锌矿、辉铋矿、自然铋和方铅矿。许多黄铁矿无疑是次生的或者明显的呈表生作用形成的胶黄铁矿-黄铁矿胶体。

黄铜矿、磁黄铁矿、磁铁矿和黄铁矿在变质作用之前似乎都已组成矿石。

黄铜矿与磁黄铁矿、浸染状磁铁矿和黄铁矿连生。

表 1 南澳大利亚 Kanmantoo 群中矿床的地质情况

矿 床	母 岩	与层理/片理的关系	形 态	不透明矿物①
铜矿床 Kanmantoo 矿山	绿泥石、石榴石-红柱石-黑云母、石英-长石、石英-云母片岩	与S ₀ 、S ₁ 不整合；与S ₂ 整合	层状、细脉状浸染状	cp, po, mt, py, cb, il, mk, ma, sp, bm, bi
South Hill 探区	石榴石-绿泥石-红柱石、黑云母片岩	与S ₀ 、S ₁ 整合	浸染状，细脉状	cp, py, il, ma, mt, mk, sp, po
Bremer 矿山	黑云母片岩	与S ₀ 不整合，与D ₁ 为剪切角	浸染状、脉状	cp, py, sp, il, mt, mk, po
铅锌矿床 Aclare 矿山	石英岩、石英-白云母-黑云母片岩	与S ₀ 、S ₁ 整合的层状矿石；与S ₀ 、S ₁ 不整合的脉状矿体与S ₀ 、S ₁ 整合；脉状矿体与S ₀ 、S ₁ 不整合	层状、脉状	sp, gn, ap, py, po, td
Wheal Ellen 矿山			层状、脉状	sp, py, gn, cp, td, ma, po
Strathalbyn 矿山	黑云母、石英-黑云母片岩	与S ₁ 整合	脉状	py, cp, ma, ap, sp, gn, po, td, mt, il
黄铁矿床 Nairne 黄铁矿	黄铁矿化片岩	与S ₀ 整合	层状	py, po, cp, gn, sp, ap, td

① 代表性矿物，以丰度降低为序排列。
缩写：构造：D₁ = 第一次变形，S₀ = 层理；S₁、S₂ 分别表示伴随第一次、第二次变形产生的片理；矿物：ap = 毒砂、bi = 自然铋，bm = 辉铋矿，cb = 方黄铜矿，cp = 黄铜矿，gn = 方铅矿，il = 钛铁矿，ma = 白铁矿，mk = 马基诺矿，mt = 磁铁矿，pn = 镍黄铁矿，po = 磁黄铁矿，py = 黄铁矿，sp = 闪锌矿，td = 黝铜矿

在黄铜矿颗粒中可以看到磁黄铁矿、磁铁矿、闪锌矿、黄铁矿、自然铋、辉铋矿、方铅矿和金的包体。黄铜矿脉进入裂开的磁铁矿中，而变形的黄铜矿颗粒在磁铁矿内呈包体出现。另一方面，有些晚期黄铁矿脉侵入裂开的黄铜矿中。伴有磁黄铁矿、黄铁矿和磁铁矿的胶状黄铜矿核呈残留物出现在分布更广的黄铜矿集合体中。黄铜矿以其颗粒大小不一（最大的4mm）和部分退火结构为特征。侵蚀的黄铜矿表现为粗粒集合体双晶的强烈变形和明显的再生（少数次晶粒的发育）与细粒黄铜矿的重结晶（退火双晶、晶界迁移和晶界平衡接触与三结合点）。在大多数黄铜矿集合体中焰状马基诺矿结晶形成的出溶现象是明显的。在粗粒黄铜矿的范围里星状闪锌矿（Craig和Vaughan, 1981）呈少见的骸晶出溶特征出现。

磁黄铁矿是几种矿石类型中含量比较多的矿物。六方磁黄铁矿是主要的相，但多达30%转变成了火焰状的晚期单斜磁黄铁矿，它沿晶粒边界增生并断裂为粗粒的磁黄铁矿集合体。磁黄铁矿像黄铜那样具有局部的退火变质结构。拉长的颗粒、变形的双晶和弯曲的条带都是其特征，但许多磁黄铁矿集合体显示为发育良好的海绵状结构。尽管在黄铜矿中有极少的磁黄铁矿脉，但没有证据表明磁黄铁矿只形成于变质阶段，相反的全部磁黄铁矿似乎在变质作用之前即已存在。

磁铁矿呈自形至半自形集合体和浸染状颗粒，其最大颗粒达0.2mm。磁铁矿颗粒中含有大量磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿包体和钛铁矿出溶薄片。在一些标本中黄铜矿、闪锌矿或黄铁矿后期充填破碎变形的磁铁矿是十分明显的。磁铁矿的浸蚀集合体呈现了发育很好的平衡结构。

黄铁矿呈三个明显的世代。最早黄铁矿世代呈胶状生长结构，并且其中含有磁铁矿、钛铁矿、闪锌矿和黄铜矿包体。这种黄铁矿成了第二世代的自形增生黄铁矿的核，它基本上不含包体。第一世代黄铁矿被认为是变质前的黄铁矿，黄铁矿系在成矿作用中形成的。第二世代的黄铁矿除去其自形增生习性外，还在脆性的变形黄铁矿里形成细脉，因此在其共生组合中它是十分晚的矿物。第三世代黄铁矿是充填在孔洞中的，并与表生作用有关。最晚期黄铁矿形成的精细壳状的带有褐铁矿夹层的胶状结构的胶黄铁矿-黄铁矿，而且表现为由黄铁矿转变为白铁矿的特征。第三世代黄铁矿的另外一个变种是以生长带形式产出，自形黄铁矿发育在较早世代的黄铁矿上。

在对 Kanmantoo 矿床的构造和变质作用的研究中，J. C. Schiller（准备中）曾强调矿化或含绿泥石片的片岩都与石榴石-红柱石-黑云母片岩的残余层理

大致成不整合。如矿化情况，含脉片岩在形状上呈筒状向北陡倾伏，与周围片岩的层理被褶皱而向南微倾伏相反。

图2A表明Kanmantoo矿山的主要构造是一个向南倾伏的向斜构造。褶皱两翼矿化性质略有不同，因此矿化分为两种类型，东翼和西翼矿化类型。两种类型之间的区别之一已表示于图2A中，即东翼矿化为石榴石-红柱石-黑云母片岩的特殊变种——变嵌晶片岩所包围。

J. C. Schiller（准备中）认为含脉片岩代表变质的围岩蚀变，该蚀变由热液事件形成。显微结构研究表明这个事件发生在变质峰和第一次片理的发生变形（D₂）之前。广泛分布的浸染状硫化物被认为是在这个阶段形成的，后来的变质作用和变形作用导致整合于片理的细脉发育。相应于第一次变形作用（D₁）的蚀变和矿化的时间尚没有确定。区域蚀变作用的性质已为变质作用弄得模糊不清了，但全岩化学分析表明主要的变化为K₂O的带出和FeO、MgO与S的加入。这种变化与在轻微变质的富铜矿床中观察到的绿泥石化一致（如新南威尔士Cobar地区，Gilligan, 1980）。

South Hill探区：对South Hill探区没有任何矿石开采的记录。本次研究的采样是根据Mines Exploration Pty, Ltd 1971进行的钻进，七个钻孔中的六个从0.6至4.8m的宽度范围内见到了矿化，铜的品位为0.20至1.23%。

South Hill的矿化与Kanmantoo矿化大致位于同一地层层位上，并有三种型式（Spry, 1976）。按丰度的顺序它们是：（1）与第一世代片理整合的石英脉组合，（2）在红柱石片岩中与片理整合并与石榴石-绿泥石条带伴生的硫化物脉状体，（3）在黑云母片岩中的浸染状硫化物。变形和硫化物就位之间的关系很难确定，因为层理与片理两者共平面。

硫化物组合主要由与原生的和次生的黄铁矿连生的黄铜矿所组成。黄铜矿已塑性变形和脆性破裂变形。South Hill的次要矿物与Kanmantoo的相似，它们是磁黄铁矿、磁铁矿、马基诺矿、闪锌矿和钛铁矿。

Bremer矿山：Bremer矿山从1850到1907的三个开采时期中至少已产铜矿石13,000吨（Duncan, 1973）。资料表明原生Cu的一般品位为8—9%（Dickinson, 1942）。

两条相距90m的平行矿脉，平均长100m，向下延伸100m，并且每条都宽1m。构造似乎是与层理成不整合和向西陡倾，倾角从72°变到垂直，并且可能形成相对于第一次变形的部分共轭剪切组（Spry, 1976）。

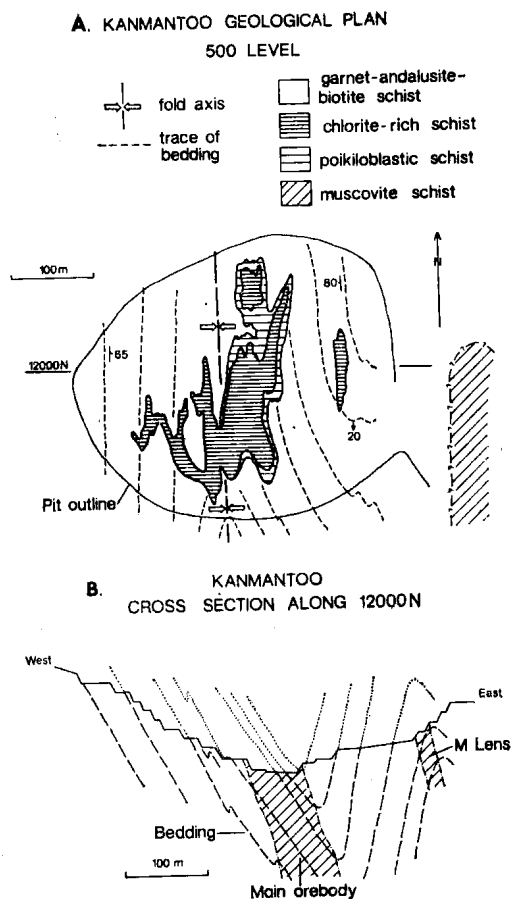


图2 Kanmantoo矿山地质, A 矿井平面图, 500中段。B 沿12000N经过主矿体和M透镜体的横剖面, 两个图都说明了矿体与伴生的热液蚀变带的不整合性质

这次研究所用的废石堆中的样品表明了这个矿山的矿物组合与Kanmantoo地区的类似, 黄铜矿和黄铁矿是主要的硫化物, 这些矿物组成了石英中的块状带和黑云母片岩中细长的浸染体。

铅锌矿床

Aclare矿山: Aclare矿山在生产了4200吨矿石后于1891停止了开采(Asking, 1968)。Cottrell(1951)曾估算其储量在8000至15000t之间。根据以前的报告, Askins(1968)估计矿石一般品位大约为Pb 6%, Zn 9%和Ag 270g/t。

矿体为板状, 水平延长约76m, 垂直延伸约90m, 厚度变化由不到1m至4.5m左右。矿体走向010°, 倾角70°W, 并向南倾伏30°(Askins, 1968)。容矿岩石是石英岩和石英-白云母-黑云母片岩。硫化物呈褶皱层平行于容矿岩中出现的层理也产在不整合的石英脉

中。

主要的硫化物是闪锌矿和方铅矿, 而毒砂、黄铁矿、磁黄铁矿和黝铜矿则较少。

Wheal Ellen矿山: Wade和Cochrane (1954)和Askins(1968)对Wheal Ellen进行了全面的地质观察。估计在1857和1911年两个开采时期生产了25000吨氧化矿石和50000吨硫化物矿石。原生矿石的一般品位为Pb20%, Zn25%, Ag370g/t和Au4.7g/t, 矿体厚度达4.3m, 已开采长度230m, 深度110m。它呈席状或板状, 既平行于层理也平行于第一次产生片理的变形作用所形成的片理, S₁(Spry, 1976)。

矿化有两种类型。块状矿石由粗粒结晶的(最大颗粒为3mm)黄铁矿、闪锌矿和方铅矿组成, 为黑云母片岩所围限。脉状矿石比块状矿石更加富铜, 硫化物主要由黄铁矿和黄铜矿组成。硫化物集合体中的变形和重结晶结构和浸染状硫化物的伸长性质表明, 矿化形成于第一次变形作用之前或同时。

Wheal Ellen矿山附近的黄铁矿片岩是含粗粒正长岩、电气石和多达20%黄铁矿的石英-白云母片岩。采自岩心的样品含有黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿, 它们的排列与第一世代片理一致。

Strathalbyn矿山: Cochrane (1954)对这个矿山(位于Strathalbyn以北3km)的地质情况进行了概括。这个矿山在1848至1858年间被开采过, 后在1907年前后又开采了几年。没有可资利用的生产信息, 但Brown (1908)曾提到铜和银-铅矿石的生产, 并且估计生产了含Pb18.5%和Ag500g/t的银-铅矿石2000吨。

矿化只限于石英-黑云母和黑云母片岩里的石英脉。虽然与Wheal Ellen, South Hill和Kanmantoo具有大致相同的层位, 但在Strathalbyn岩系中还没有找到红柱石片岩。矿化带为板状体, 厚达4m, 矿脉地面走向长1km, 倾向70°E。分析表明矿脉的北段富铜, 南段富铅-锌。在光片中观察到的主要不透明矿物, 按丰度减少的顺序为黄铁矿和胶黄铁矿-黄铁矿、黄铜矿、白铁矿、毒砂、闪锌矿、方铅矿和磁黄铁矿。

Nairne黄铁矿矿体

Skinner(1958), LaGanza(1959), George(1967)和Nenke(1972)对Brukunga Nairne黄铁矿矿床已进行了大量的研究工作。Jensen和Whittle (1969)对矿床还进行了硫同位素的初步研究。

毫无疑问, 矿床属于沉积成因。黄铁矿层在走向长度达105km的范围内都进行了测图, 某些个别矿层长达32km(Mirams, 1965)。在Brukunga黄铁矿矿层的总厚度为100m, 从1955至1972该处作为硫矿被开采

(Thomson, 1975)。

黄铁矿和六方磁黄铁矿是矿层中主要的硫化物，并伴有黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂和黝铜矿。复杂的矿化脉和矿脉结合系统成为矿床的一部分，被认为是变质作用期间由重新活化所形成的 (George, 1967)。

硫同位素的研究

取样和样品的制备

Kanmantoo 矿山露天矿对主矿透镜体和M透镜体提供了深达110m(R. L. (相对高度) = 101m) 的样品在地下采到了D透镜体, (见图3和表2)。金刚石岩心可采集到C、F-G和南透镜体与主矿透镜体深部的样品。勘探钻进提供了South Hill、Strathalbyn和Wheal Ellen的样品, 在Aclare矿山的地下和废石堆进行了取样, 在Bremer矿山由于地下采区进不去只在废石堆中取样。

在粗晶的地方, 可用齿形钻在打光的岩块上直接采取硫化物样品。对混合的硫化物矿石样品进行碾碎和筛分, 通过重液、磁分器或超级陶洗器把硫化物分离出来。用选择的酸进行浸蚀使细的交生硫化物相分离和净化, 然后用Smith和Croxford (1973) 流程使形成的 H_2S 沉淀为银的硫化物。上述分离流程一般可使样品纯度至少达95%。

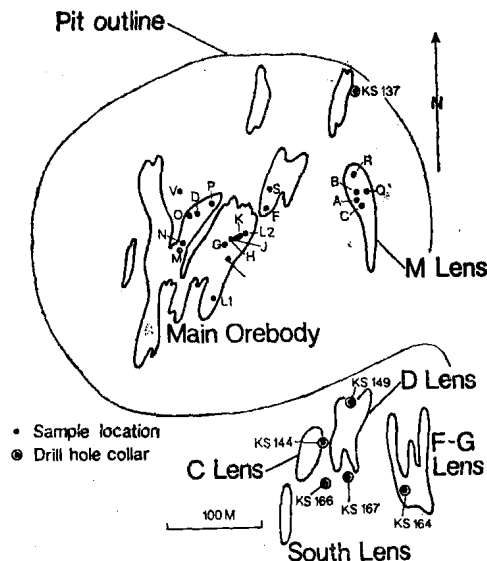


图3 Kanmantoo矿山的透镜状矿体和样品位置的分布。图上表示在露天矿中主矿体和M透镜体样品的位置和经过主矿体(深度相交)C、F-G和南透镜体的采样钻孔的位置。主矿体和M透镜体的草图素描于R. L. (相对高度) 107m, C、D、F-G和南透镜体于R. L. 176m

用Robinson和Kusakabs(1975)方法在真空中将适量单矿物硫化物和 Cu_2O 燃烧至900℃, 可得到用于同位素分析的 SO_2 。同位素值的测定是由墨尔本的自然科学实验室和悉尼的地质资源CSIRO研究所在VG微型质谱602机器上进行的。可与迪亚布洛峡谷陨硫铁(CDT)和各种工作标准产生的 SO_2 直接对比, 本次研究时的重复分析(见表2)和用同位素标准校正结果表明方法的一般精度为 $\pm 0.2\%$ 。

结果

Kanmantoo矿山, 一些小的贱金属探区和矿山与Nairne黄铁矿矿床的 $\delta^{34}S$ 值都列于表2和图4。Kanmantoo矿山采样的六个透镜状矿体的数据都在图5中进行了说明。从硫同位素数据中得出了三个明显的组。

1. Kanmantoo矿山的黄铜矿-磁黄铁矿-磁铁矿矿化的矿柱提供的 $\delta^{34}S$ 值(除去样品V2)为3.5至12.4‰, 平均值为 $8.0 \pm 2.3\%$ 。代表露采北部低品位矿化的钻孔KS42中的黄铜矿的 $\delta^{34}S$ 值约16‰, 而主矿透镜体表生带的黄铁矿(样品V2)呈现极其富集 ^{34}S ($\delta^{34}S = 39.6\%$)。

Kanmantoo的各个透镜状矿体(图5), 以其原生矿石矿物之间有约6%的分散分布为特征。各个透镜状矿体的硫化物的算术平均值从主矿体和M透镜体的大约10‰变到C、D和南透镜体低到6‰。尽管在透镜状矿体之间有这些不同, 但在每个透镜体内没有空间上的变化。主矿体取样的垂直间距大于500m, 不能表明任何随深度而变的趋势。在比较主矿体东翼型矿石($\delta^{34}S = 10.0 \pm 0.9\%$)与西翼型矿石($\delta^{34}S = 8.8 \pm 1.2\%$)的硫化物的平均 $\delta^{34}S$ 时, 试验显示出一个1.2‰的有意义的差别。

2. 第二组包括一些小矿床。Wheal Ellen铅锌矿床的 $\delta^{34}S$ 值变化较小(2.2—6.5‰), 其平均值为 $3.6 \pm 1.2\%$ 。South Hill和Bremer的小铜矿床与Aclare和Strathalbyn的小铅锌矿床都显出相似的硫同位素组成。这些矿床的硫化物的变化范围为-4.7至+3.9‰, 并且每个矿床的 $\delta^{34}S$ 样品平均值都在1—0‰。

3. 第三组由黄铁矿片岩组成。与Wheal Ellen矿床相邻的黄铁矿片岩的平均 $\delta^{34}S$ 值为-17.0‰。这个黄铁矿层在地层上位于Nairne黄铁矿矿床之上, 并且只是Tapanappa组内的许多层位之一(Daily和Milhes, 1972)。其范围(-19.9至-15.1‰)与Jensen和Whittle (1969)报导的Nairne黄铁矿床和这次在Nairne (DDH9)和South Hill探区西3km研究的Nairne黄铁矿样品基本相似。

表 2 南澳大利亚Kanmantoo群样品的硫同位素分析

样 品		$\delta^{34}\text{S}\%$					说 明
		黄铁矿	磁黄铁矿	闪锌矿	黄铜矿	方铅矿	
Kanmantoo 矿山②， 主矿体							
D					6.4		R. L. 122m, W limb③
E					9.8r①		R. L. 107m, E limb
G	1				8.9		R. L. 101m, E limb
	2				8.9		三个单独的脉
	3				9.3		样品
H					9.0		R. L. 101m, E limb
J	1		10.1		11.2		R. L. 101m, E limb
	2		10.8		11.9		两个样品
K			9.6		10.4		R. L. 101m, E limb
L	1				10.2		R. L. 107m, W limb
	2		9.3		9.5		R. L. 101m, E limb
M					11.6		R. L. 107m, W limb
N					11.7		R. L. 107m, W limb
O					8.0		R. L. 107m, W limb
P		8.2			8.3		R. L. 107m, W limb
S					11.2		R. L. 107m, E limb
V	1			8.3	7.7		R. L. 122m, W limb
	2	39.6		8.0			晶洞内衬
	3				8.2		
	4			8.7			
KS137	581.1m		8.8		8.3		R. L. -335.4m
	592.1m	9.2 r	8.8 r		8.7		R. L. -341.2m
	595.9m		7.8		8.1		R. L. -343.0m
	609.8m				9.3		R. L. -350.6m
							主透镜体的最深交切，580.8至617.4 m (1.03%Cu)
C透镜体							
KS144	71.3m		4.0		4.4		R. L. 143m, 矿相交于70.1至85.4m
	81.4m	9.8			9.6		
KS149	181.4m				7.0		R. L. 46m, 矿相交于180.8至186.9 m
	184.5m		5.6		5.3		
	186.3m		6.0		6.4		
D透镜体							
1					3.9		R. L. 140m, 西中间平巷，含矿透镜 体北端
2		5.4 r			4.6		
3			4.3 r		4.7		
4					7.4		R. L. 137m, 东中间平巷，含矿透镜 体东边
6			4.8		5.5 r		
7	1				9.0 r		
	2				7.8 r		
8			8.5		8.7		R. L. 177m, 含矿透镜体的中西部
9					9.2		

续表

样 品	$\delta^{34}\text{S}\%$						说 明
	黄铁矿	磁黄铁矿	闪锌矿	黄铜矿	方铅矿	其他	
10				12.4			
11				6.7			
12 i				3.5			R. L. 177m, 含矿透镜体东边; 样品12(1)、1.5cm 条带; 样品12(2) 和(3)、2cm条带
2				3.5			
3				3.5			
F—G透镜体				9			
KS164 34.5m				7.6			R. L. 159m
39.3m	8.0						R. L. 154m
50.3m				9.0			R. L. 144m
55.8m				5.3			R. L. 139.4m 矿相交于10.8至59.5m (1.01% Cu)
Mi透镜体							
A	9.5	9.7		9.6			R. L. 122m
B				10.4			R. L. 122m
C				9.4			R. L. 122m
Q				9.5			R. L. 122m
南透镜体							
KS166 88.1m				5.5			R. L. 131m, 矿相交于85.1至91.2m
89.9m		5.7		4.5			(0.89% Cu)
SK167 87.2m				5.3			R. L. 122, 矿相交于83.5至89.6m
89.0m				8.6			(1.31% Cu)
Miscellaneous							
W						10.6	主矿废石堆中的辉钼矿
050				9.6			露采矿之南钻孔
051		9.7		9.6			KS104, 0.5km的样品
052	16.2			15.8			露采矿之北钻孔KS42的样品
South Hill 探区							
045	3.9						DDH SH4, 100.7m
046	-3.1	2.5					DDH SH4, 100.7m
047	-0.5						DDH SH7, 88.4m
049				3.1			DDH SH7, 88.7m
Bremer 矿山							
042	1.3			0.9			地表废石堆的样品
123				1.6			
124				-3.1			
Aclare 矿山							
1						0.1	靠近主竖井的巷道中的块状矿石的毒砂
2		3.1					石英脉中的浸染状矿化, 废石堆中的样品
3		1.8	1.7				块状矿石样品; 3和4采自废石堆,
4			-0.9				8采自主竖井附近的巷道
8					-2.6		

续表

样 品	$\delta^{34}\text{S}\%$						说 明
	黄铁矿	磁黄铁矿	闪锌矿	黄铜矿	方铅矿	其他	
Wheal Ellen 矿山							
035			3.9		2.2 r		地表废石堆中采的样品
036			4.0 r		2.3 r		
038					2.6		
039	2.4 r	2.3					
060	6.5	4.5					
061			4.6				
110	4.2 r		3.8				
DDH W3A 62.3m	-15.1						从DDHW3和 W3A 的含黄铁矿片岩中采的样
DDH W3 90.5m	-16.3						
93.0m	-19.9 r						
94.6m	-18.5 r						
94.8m	-15.1						
Strathalbyn 矿山							
056	-3.3						从DDH ST1中采的样
057	2.8						
058	0.0						
059	-4.7						
Nairne 黄铁矿							
46	-15.4						South Hill探区西3km 的露头样品
62	-16.3						
DDH 9 33.5m	-12.5						从Nairne DDH9岩心中采的样品
36.6m	-14.7						
39.6m	-15.8						
42.7m	-15.7						
45.7m	-16.4						
48.8m	-15.7						
54.9m	-17.4						
57.9m	-16.7						
67.1m	-17.8						
70.0m	-17.6						
73.2m	-17.1						
76.2m	-15.9						
82.3m	-15.9						
85.3m	-16.7						
88.4m	-13.7						
91.4m	-12.9						
94.5m	-11.9						
97.5m	-14.5						
100.6m	-13.1						
103.6m	-15.5						
106.7m		15.7					
112.8m	-15.1						
119.0m	-15.2						
121.9m	-15.4						

① r = 双重测定 ② 样品A至W采自露天矿 (见图3); 1至12采自地下位置; 其余的为岩心样品 ③ R.L. = 相对高标 (基准面高标在Kamantoo露天矿底板之下约100m)

硫同位素地热温度测量

为了在角闪岩相变质区中建立同位素平衡和应用硫同位素地热温度测量,我们分析了34个共生硫化物对同位素(表2)来作为检验。

在解释数据时一些限制条件显然是必须的:

1. 用黄铁矿作为矿物对的一员是不合适的,因为在许多矿石中它有几个世代,特别是表生带的黄铁矿。此外,黄铁矿比其共生的硫化物具有广泛得多的沉淀条件(Ohmoto和Rye, 1979)。

2. 对于一般的贱金属硫化物来说,最精确的硫同位素地温测量是通过方铅矿与磁黄铁矿、闪锌矿或黄铜矿中的任一种结成的矿物对来获得。由于Kanmantoo群中矿石的性质,只有两种这样的对的数据是可用的(样品035和036, Wheal Ellen矿山)。

温度的计算是根据Ohmoto和Rye (1979) 提出的分馏系数,其误差范围根据固定分析误差 Δ 值为 $\pm 0.2\%$ 。根据这些同位素数据可以得出如下的结论:

1. 在磁黄铁矿-黄铜矿(分析了16对)、黄铁矿-黄铜矿(7对)和黄铁矿-磁黄铁矿(5对)矿物对之间,同位素平衡一般来说是不明显的。计算出的共生硫化物的温度表明校正后的同位素分馏范围从小于100°C变化到约950°C;然而由于这三种同位素地质测温术所测的 Δ 很大,所以误差范围是很大的。

2. Wheal Ellen矿山的两个共生闪锌矿和方铅矿样品得到的温度是379°C。这些温度是一致的,闪锌矿-方铅矿系统有一个理想的实验误差(380°C时为 $\pm 60^\circ\text{C}$)和没有结构上的复杂情况是明显的。相对于根据硅酸盐稳定数据解释出的高峰期变质作用的温度(500°—600°C)来说,这种方法解释出的温度是低的(Sory, 1976; Mancktelow, 1979),并且偏差可能是由于在闪锌矿-方铅矿系统中缺乏淬火所引起。另一方面,在Wheal Ellen黄铁矿与闪锌矿共生得出的597°C是推定的。这可能证明在较高温度下黄铁矿具有不用重新结晶而仍能保持同样的同位素组成的性能,并且与Ohmoto和Rye (1979) 提出的在闪锌矿和方铅矿之间发生同位素交换时的变质程度要比黄铁矿和其他矿物之间的要低一些的意见是一致的。

3. 从代表Kanmantoo矿山主矿体的晚期矿化的晶簇中的共生闪锌矿和黄铜矿获得一个227°C的计算温度。从主矿带的结构证据表明有些闪锌矿(和黄铁矿)形成于黄铜矿内的脆性破裂之后,对于闪锌矿来说,一个约200°C的最高温度是与黄铜矿在低压下的脆性-延性转变相吻合的(Kelly和Clark, 1975)。在闪锌矿和黄铜矿之间的同位素平衡可以希望在降至约

200°C的最低温度时达到;但是对这个系统来说计算误差是大的(在200°C时为 $+180^\circ$, -130°C)。

讨 论

黄铁矿片岩

无论是这次研究或是Jensen和Whittle (1969) 的研究,产于Wheal Ellen矿山Tapanapa组中的黄铁矿片岩与Nairne黄铁矿床中得出的硫同位素组成基本是一致的。黄铁矿片岩的硫含量(平均 $\delta^{34}\text{S} = -17\%$)看来显然为生物成因,其值与Schwarcz和Burnie (1973) 和Ohmoto和Rye (1979) 对静海环境[含有的易利用的硫酸盐和源于寒武纪海水的硫酸盐($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} = 30\%$; Holser, 1977)]形成的 H_2S 所描述的同位素分配型式完全一致。

Kanmantoo 矿山

对矿床的约束:在Kanmantoo矿山中和区域内矿床之间共生硫化物矿物之间同位素的不平衡与各个透镜状矿体内和矿体之间很大的同位素变化的判别,表明变形作用和变质作用还没有清除以前存在的同位素的分配情况。根据这些可能确定区域内的硫的来源和导致各种矿化类型的形成过程。

磁黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿和小量黄铁矿的原生矿石组合被认为是Kanmantoo矿化的结构证据。根据这个前提,对成矿流体的化学特征就可以给予限制,然后可以估计矿液中含水硫型体($\delta^{34}\text{S}_{\text{S}_2\text{S}}$)和硫的潜在来源。

对于矿床来说,一个低盐度、微酸的热液运移足够Cu的温度至少需要200°C(Walsh和Solomon, 1981)。矿液的总硫含量(ΣS)也影响Cu的溶解度。根据总硫含量为 10^{-2} 至 10^{-3}m ,估计矿床(如Barnes, 1979)或现代地热系统(Seward, 1979)由高温流体形成似乎是合理的。含有 10^{-2}m ΣS 并与磁黄铁矿和黄铁矿呈平衡状态的热液,在350°C时迁移呈溶解的 CuCl 络合物的Cu 1 ppm是容许的(Walsh和Solomon, 1981)。在350°C和与磁黄铁矿和磁铁矿平衡的溶液含 ΣS 为 10^{-3}m 时,铜的溶解度大于10ppm,而在较低温度(约280°C)允许黄铁矿与磁黄铁矿和磁铁矿共存。如上所述,对于Kanmantoo矿山来说早期黄铜矿-磁黄铁矿-磁铁矿与晚期黄铜矿-磁黄铁矿-磁铁矿-黄铁矿共生似乎是恰当的。因此, 10^{-3}m 的 ΣS 值被用于设计图6和下面的讨论。

Sangster和Scott (1976) 和Large (1977) 为形成层状贱金属硫化物矿石的溶液的盐度和pH提供了大

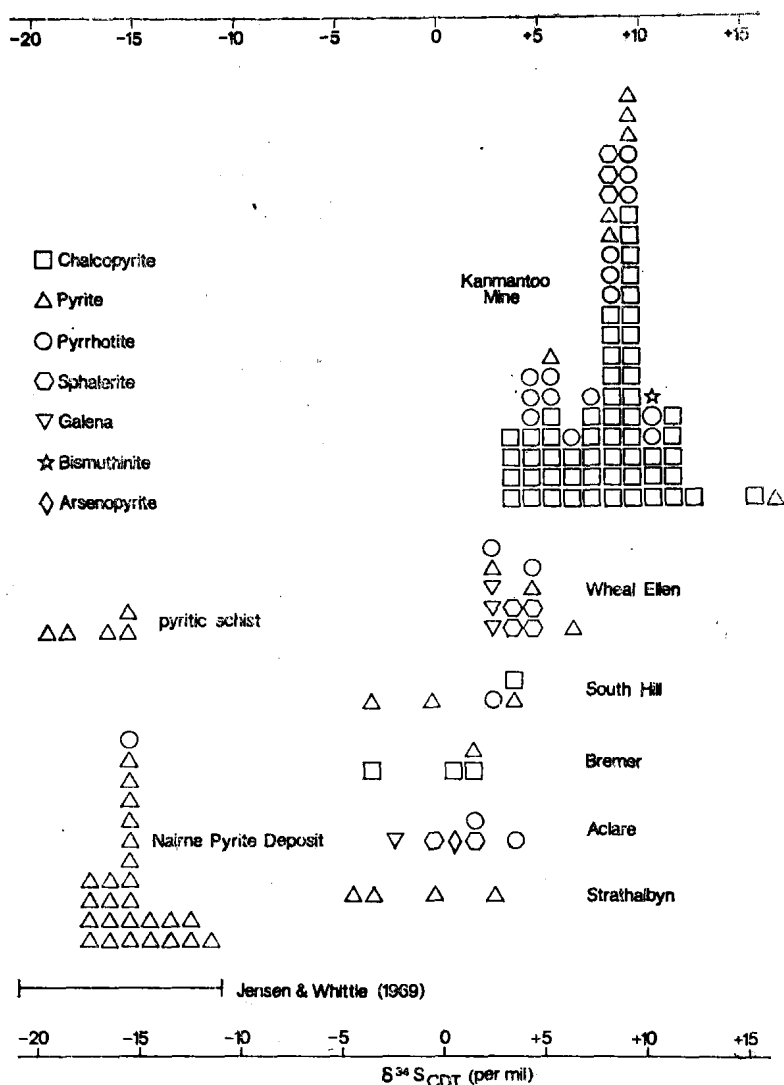


图 4 Kanmantoo群内硫化物矿床的 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ 值。Jensen和Whittle(1969)测定的Nirne黄铁矿矿床的值域对比

量资料。这些资料与火山-宿主环境有关,可能都不适合于Kanmantoo槽的情况。N. S. W地区Cabarr的沉积-宿主铜矿床的未发表的流体包裹体资料(P. K. Seccombe和B. R. H. Skilton, 1984)表明,成矿流体的平均盐度为1 m NaCl相当量。由于Kanmantoo群中的变质作用很可能已消除了整个变质前的流体包体,因此对Kanmantoo群中成矿流体的化学成分来说没有可靠的资料可利用。这里用的是1 m NaCl相当量的盐度和低于中性一个单位的pH值。

根据上述资料,在Fe-S-O系统中稳定性的范围和1 m氯化物溶液中呈氯化物络合物的Cu和Fe的浓度都标绘于图6中。

图解的条件是: $\text{pH} = 1$ 单位的酸, $\Sigma\text{S} = 0.001\text{m}$, $\text{Ca}^{+2} = 0.001\text{m}$, $\text{Mg}^{+2} = 0.025\text{m}$, $\text{K}^+ = 0.1\text{m}$, $\text{Na}^+ =$

0.9m, $\text{Cl}^- = 1.0\text{m}$, $\delta^{34}\text{S}_{\text{XS}} = 8\text{‰}$ 。图例: — = $\delta^{34}\text{S}_{\text{XS}}$ 等值线, — = ppm Fe, = ppm Cu。

从图6可明显看出,与黄铜矿、磁黄铁矿、磁铁矿成平衡状态的矿液是还原的(H_2S 可能是主要的含水硫型体)。对于一个还原的矿液来说,含水 H_2S ($\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$)的硫同位素组成可能是溶液中总硫型体的同位素的组成($\delta^{34}\text{S}_{\text{XS}}$)和接近于各个沉淀硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值。相对于溶液中的 H_2S ($\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$)来说,硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 的差别(这里i代表一个金属硫化物型体)在350℃时可能小于0.25‰。因此当Kanmantoo矿山的硫化物沉淀时矿液中的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{XS}}$ 值,必定从大约3‰变成12‰。

根据溶液中总硫的同位素组成值8‰(Kanmantoo透镜状矿体的平均硫同位素组成)得出含水 H_2S 的硫

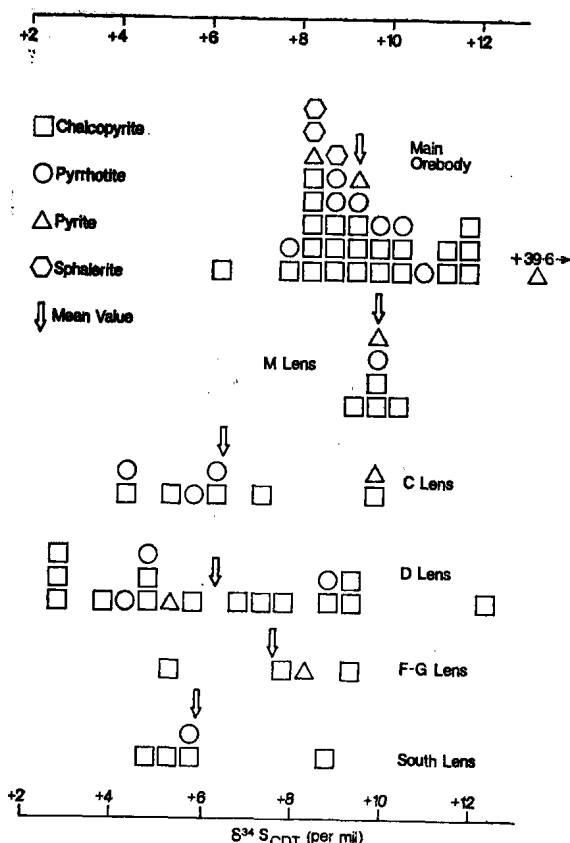


图 5 Kanmantoo 矿山透镜状矿体的 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ 值

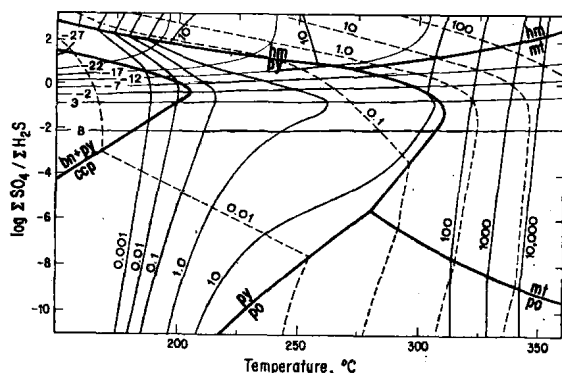


图 6 $\log \Sigma \text{SO}_4 / \Sigma \text{H}_2\text{S}$ 对 T 图, 描绘溶液中 H_2S 的硫同位素组成和在 Cu-Fe-S-O 系统的各相平衡的 $1\text{m NaCl-H}_2\text{O}$ 溶液中的 Fe 和 Cu 的溶解度。应用 Ohmoto 和 Lasaga (1982) 关于在含水硫化物和硫酸盐之间平衡的同位素分馏系数与温度关系的资料, $\delta^{34}\text{S}_{\text{ss}}$ 等值线可根据 $\delta^{34}\text{S}_{\text{ss}} = 8\text{‰}$ 计算出来的。在不是 $\delta^{34}\text{S}_{\text{ss}} = 8\text{‰}$ 的情况下, $\delta^{34}\text{S}_{\text{ss}}$ 值要作适当调整。Kanmantoo 矿山的矿化顺序, 可能是根据大于 350°C 的磁铁矿-磁黄铁矿界线至约 280°C 黄铁矿呈附加相出现得出的。沉淀伴随着溶液氧化状态的增长

同位素组成的等值线表示于图 6 中。

对于溶液温度在 350°C 附近来说, 在地下溶液流的各种条件下, 含水硫化物和硫酸盐型体之间获得同位素平衡是可能的 (Ohmoto 和 Lasaga, 1982)。因此, 表示于图 6 矿液中的含水 H_2S 和 ΣS 之间同位素平衡关系仍是可能的, 尽管在 Kanmantoo 矿床中硫化物矿物之间存在着同位素的不平衡情况。在硫化物矿物之间硫同位素不平衡的可能原因是与硫化物的共生或沉淀后的影响有关, 这在后面将加以讨论。

硫源: 矿液的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{ss}}$ 范围从约 3 至 12‰ 不能用单一的硫源来解释。寒武纪海水中 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4} = 30\text{‰}$) 被还原的硫就是一个明显的来源, 但是从 Kanmantoo 矿床推知还原矿液中沉淀的硫化物的这种来源只能得到约 30‰ 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值。海水的硫同位素组成成为低得多的值可能是由于地壳中通过的海水引起的。在海水-岩石互相作用的环境中 (包括经常改变着的温度和水/岩比值和同时伴随着硫化物和硫酸盐矿物从溶液里沉淀出来而失去 H_2S 和 SO_4^{2-}) 从在地壳中对流循环时的还原海水获得的 H_2S , 其同位素组成也许会轻到 15‰ (见 Styrt 等, 1981)。同样的理论用于沉积岩层中非对流的原生海水似乎是合理的。因此, 在这些条件下, 具约 15‰ 的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的硫化物矿物可能是从还原矿液中形成, 它们的硫的唯一来源是寒武纪海水。钻孔 KS42 中的非矿硫化物 (样品 052) 的硫同位素组成范围为 15.8 至 16.2‰ , 它们的来源可能归于这种作用。

对 Kanmantoo 矿床中的所有其他硫化物来说, 一个富 ^{32}S 的硫的补充来源显然是需要的, 并且在 Kanmantoo 群的另外一些地方, 它们的同位素组成轻于 15‰ , 那么那些地方的硫化物都可以被解释为从还原溶液沉淀出来的。火成作用和生物作用都可以供应富 ^{32}S 的硫。但是, 在寒武纪层序里火成源的硫 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} \approx 0\text{‰}$) 是不明显的。作为轻硫更有意义的来源是在 3 至 4 km 地层间距里的黄铁矿片岩, 它们位于 Kanmantoo 群里的矿化层之下并含被说明的生物硫 (Jensen 和 White, 1969, 和本文的研究)。利用一个质量平衡计算的例子 (如 Lusk, 1972), Kanmantoo 矿山硫化物中存在的硫同位素组成的范围 ($3-12\text{‰}$) 可能通过修改过的寒武纪海水硫 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{ss}} = 15\text{‰}$) 和生物硫 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} = -17\text{‰}$) 的混合来得到, 其比例在 1.5:1 和 9:1 之间。

修改了的海水硫的同位素组成没有一个明确的固定值。这种值依赖于溶液运动和循环的性质与包括在地壳中占优势的硫的反应程度和性质。类似地, 通过流动着的热液从黄铁矿片岩淋滤出黄铁矿的硫的程度, 将依赖于溶液利用这种来源层的程度和溶液的性质。

2

44

3

次要的贱金属矿床

— 13 —

矿化是呈脉状的或浸染状的。脉状矿体与第一次变形作用形成的片理是平行的。这三个矿床的硫同位素的分布看来是相同的和集结在0‰的附近。被推知原生矿物黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿和少量磁黄铁矿与产出在Kanmantoo的类似。这些次要矿床的硫化物的平均 $\delta^{34}\text{S}$ 接近0‰,用双硫源似乎是最好的解释,并且如对于Kanmantoo矿山讨论过的那样,从生物和海水源获得可变的富 ^{32}S 的硫经过对流混合控制这些矿床的平均 $\delta^{34}\text{S}$ 值的可能是适用的。

在Aclare和Wheal Ellen矿山块状富铅-锌的矿体与层理和第一次片理整合可能代表同生的盆底堆积。在Aclare的黄铁矿和磁黄铁矿几乎为等量的简单硫化物的组合,表明 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{FeS}}$ 和相似于前面讨论过的硫源可能占优势。在Wheal Ellen矿山黄铁矿超过磁黄铁矿,这可能意味着沉积条件比在Aclare的相对是更氧化的。在这些环境下,通过寒武纪海水部分还原而来的硫,可能是在Wheal Ellen矿山测定的硫同位素组成变化范围为2.2—6.5‰的唯一的硫源。在Wheal Ellen矿山,黄铁矿片岩(平均 $\delta^{34}\text{S} = -17.0\%$)的作用对贱金属矿化来说因为硫的局部来源,故不重要。如果我们假设Wheal Ellen的硫化物矿床是从温度在250°至300°C $\log \Sigma \text{SO}_4^{2-} / \Sigma \text{H}_2\text{S} \approx 0$ 的矿液中形成的时,那么从图6可以看出,轻如0‰的 $\delta^{34}\text{S}$ 值可能从沉淀的硫化物中获得,如果从还原的海水中得到的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 可能已低于15‰的话。在Aclare和Wheal Ellen矿床形成时可能已经活动的溶液排放的可能位置不能确定。在Wheal Ellen矿山的脉矿体仅含少量的黄铜矿,并且在矿床中没有找到不整合矿液通道带存在的证据。

对溶液运移的控制

在大致相同的地层水平上所有被研究的贱金属的位置与在Kanmantoo槽中沉积物堆积作用进行时在盆底上许多单独的热液排放点内和周围同时形成的矿床是一致的。Kanmantoo矿床可能代表一个随着时间反复不定地活动的互相靠近的火山通道田,并且在某些方面与从21°N的太平洋洋脊报导的一些现代海底热泉田相似(Rise项目组,1980)。

在Kanmantoo沉积层里地热溶液循环的开始、控制和分布的原因基本上还没有解决,特别在矿化的Tapanappa组沉积的时候。对流溶液循环的主要能源是火成活动(Norton和Cathles,1979)。没有从火成活动来的岩浆热,对流循环可能仍就进行;但是,对于上涌溶液来说,温度高于300°C只有溶液贯入深度达约10km才是可能的。换句话说,非对流溶液从沉积

盆地排出可能是由于地震泵所引起的(Sibson等,1975)。前面讨论过的硫同位素证据,会表明包括任何上述作用在内的溶液是修正了的寒武纪海水。

在Kanmantoo群里火成活动是不明显的,岩石的变质作用和变形作用在研究区内会使在岩石中发现火山碎屑造成困难;但是,在Kanmantoo岛上的Kanmantoo群的轻微变质的岩石中不含火山碎屑物质(Daily等,1979)。早寒武纪的中至基性火山岩(Truro火山岩,Forbes等,1972)位于Truro-Angaston地区(Adelaide东北70km)的Kanmantoo群之下。晚寒武至奥陶纪的花岗岩(Deamerian造山运动)侵入到本次研究区之外Adelaide以南80km的Encounter Bay和Adelaide以东60km的Palmer地区的Kanmantoo群中(Thomson,1975)。由于Kanmantoo群的Tapanappa组里的铜-铅-锌矿体的特点似乎基本上是同沉积的,所以这些火成事件与矿石形成无关。

在早至中寒武纪的次要区域构造发生的矿化事件的同时,已经形成的主要生长断层(Kangarooian运动;Thomson,1975),被认为是在矿化区的正在下沉的Kanmantoo槽的枢纽附近(Thomson,1969)。这些构造将集中由对流或地震泵排出的溶液,并且可能代表现代Bremer、Nairne和Encounter断层系统的前兆(Thomson,1975),它显示与已知矿化带在空间上紧密共生。这些生长断层可能延伸达10km至Tapanappa组的矿化地层水平之下,经过下伏的Kanmantoo群沉积物达到前寒武纪基底(Thomson,1969)。虽然溶液贯入的这种深度可能从正常的地热梯度产生矿石运移所需的大于300°C的温度,而由区域构造幕产生的,在Kanmantoo群里而未被发现的火成活动则是另一个推测的热源。

结 论

在澳大利亚南部的变质和多次变形的Kanmantoo褶皱里,在Kanmantoo群沉积物堆积的时候,Kanmantoo矿山和一些次要矿床中的不整合黄铜矿、磁铁矿、磁黄铁矿和黄铁矿矿体,由修正的寒武纪海水经深(最小为3—4km)的对流循环或地震泵排放到盆底而形成。在Tapanappa组里大多数贱金属矿床的位置都在相同的地层层位上和为使上涌矿液的金属有效的沉淀而明显需要一个很大的温度梯度,表明矿化发生在近地表环境。大多数矿床在地下火山通道里呈网脉,脉或浸染的带;但是在Wheal Ellen和Aclare矿山的块状铅-锌矿体可能曾堆积在海底上。

贱金属矿床硫化物的硫同位素组成的(黄铁矿片岩除外)变化范围为-4.7至16.2‰(在Kanmantoo

矿山记录了表生带的一个黄铁矿为39.6‰的 $\delta^{34}\text{S}$ 值)。在Wheal Ellen 矿 山和 Nairne 黄铁矿矿床中, 黄铁矿片岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值都大量加入了 ^{32}S , 并且其平均值为 -16.5‰。

根据原生矿石矿物对矿液中 $\delta^{34}\text{S}_{\text{xs}}$ 的制约和矿液的可能的化学性质, 对许多贱金属矿化来说, 一个双硫源是需要的。除了还原的寒武纪海水硫酸盐之外, 矿液中供给硫化物矿床的大部分硫化物必定曾是从一个富 ^{32}S 的硫源派生来的。根据全部沉积的Kanmantoo

群和其下的元古代基底, 火成硫源可以不予考虑, 而从直接位于Kanmantoo群的主要矿化层位之下宽3—4 km的地层段里的含黄铁矿沉积物中淋滤富 ^{32}S 的生物硫, 被认为是第二个硫源。两种硫源混合比例的不同和热液氧化状态的差异是引起区内Kanmantoo 矿山和各个矿床中透镜状矿体之间硫同位素组成的差异的原因。

译者 唐祚均