脉状金矿床水/岩反应体系地球化学*

范宏瑞 谢奕汉 王英兰
（中国科学院地质研究所，北京）

提 要：脉状金矿中由水/岩反应造成的交代蚀变是成矿流体在其运移过程中与围岩达到化学、同位素和热力学平衡时的产物，所涉及的热液类型为 H_2O-CO_2-NaCl ± CH_4 ± N_2 ± H_2S。在多数脉状金矿中都发生了贵金属元素（Au 和 Ag）及与其有关的稀有元素（As、Sb、Se、Te、Bi、W、B）、大离子亲石元素（K、Rb、Ba、Li、Cs、Tl）与挥发份（H_2O、CO_2、CH_4、H_2S）的富集，而形成的蚀变矿物组合与容矿围岩的化学性质及水/岩反应时的温压条件直接相关。水/岩反应是造成热液中金沉淀成矿的主要因素之一。

关键词：脉状金矿床 成矿流体 水/岩反应

脉状金矿床是世界上最重要的金矿类型，由于它主要产在太古宙绿岩带内，故也被称为绿岩带金矿或太古宙金矿，文献中有的学者又称其为中温热液金矿。目前一般认为，脉状金矿系指分布在太古宙花岗-绿岩带内或太古宙以后以火山岩为主的变质地体内的脉状金矿床。其形成的实质是：沿运移通道（常为具剪切性质的构造断裂，但也可以是先成的脉体或不同岩性接触面等）上升的含矿热液与围岩发生交代作用？水/岩反应，导致流体的性质发生显著变化，在围岩蚀变的同时，热液中金的溶解度迅速降低并沉淀成矿。因此，水/岩反应是脉状金矿成矿系统最明显的特征之一。

1 脉状金矿床热液蚀变特征

1.1 热液蚀变的控制因素与机制

剪切带、断裂带或破碎带等流体迁移通道内石英脉体周围的热液蚀变组合反映了开放体系下，流体在其运移过程中与围岩达到化学、同位素和热力学平衡时的产物。控制脉状金矿分布及其围岩发生热液蚀变的因素有：① 矿床形成时的区域构造和应力场背景；② 容矿围岩的化学性质；③ 含矿热流体的组成；④ 热液蚀变或金成矿时的温度与压力条件等。由水/岩反应造成的围岩交代蚀变主要有下列两个机制，一是在开放状态下的破碎带或微裂隙中，流体沿矿物颗粒边缘发生渗透迁移并与周围矿物发生反应；另一是在破碎带孔穴内从处于相对静止状态的流体中离子发生扩散作用。一般来说，脉状金矿热液蚀变体系中流体渗透机制要远远大于离子扩散机制[2]。由于围岩蚀变生成矿物受控于水/岩比值和热液流量，可以认为围岩蚀变也受流体运移体系及所流经通道的变形机制等因素控制，并在这些因素联合作用下热液得以与围岩矿物接触而发生交代反应。

* 国家自然科学基金 49773193 和 49102021 项目资助
范宏瑞，男，1963 年生，博士，副研究员，主要从事流体成矿地球化学和岩石学研究。邮政编码：100029

1.2 脉状金矿床的蚀变分带与矿物学

不同温压下，脉状金矿围岩蚀变组合中矿物种类变化非常大，其蚀变分带与距离流体运移通道的远近、容矿围岩的化学组成及成矿时温度和压力条件有关。显尔易见，蚀变矿物组合在垂直于流体运移通道的剖面上变化最大，而蚀变带的范围可以从数毫米到数十米宽。紧临流体运移通道的强烈蚀变带反映了容矿围岩与热流体直接反应结果，而远离流体运移通道的中－弱蚀变带则显示出水/岩比值的降低以及蚀变岩化学成分梯度的变化，它代表的是流体向围岩渗透的程度。各蚀变带边界可以是突变也可以是几厘米到数米宽的渐变带，但蚀变最内带与外带常为突变，蚀变外带之间则多为渐变关系。一般来说，蚀变内带的矿物组合比较复杂，各期蚀变可相互叠加，而蚀变外带中的矿物组合则相对比较简单，因此有学者认为远离流体运移通道的矿物蚀变组合代表的是流体-围岩交代反应的前锋[3]。

在容矿围岩性质单一的脉状金矿床中，平行于流体运移通道的围岩蚀变组合变化一般较小，因而水/岩反应分带也被认为是围绕流体运移通道产生的系列蚀变晕。在容矿围岩相同而成矿温度却相差很大的金矿床中，其水/岩反应蚀变矿物组合则有显著差异。如在绿片岩相矿床中，石英和碳酸盐（铁白云石）矿物是主要的脉石矿物，并且碳酸盐矿物也出现在脉体周围的蚀变岩中；而在形成于角闪岩相的脉状金矿中，碳酸盐矿物则一般存在于脉体中，并且只是方解石。随着温度的升高，铁和砷的硫化物从黄铁矿和毒砂分别转变成磁黄铁矿和斜方砷铁矿，而斜长石成分中钙含量增大，从绿片岩相中的钠长石转成角闪岩相中的奥长石-中长石。在高温矿床的蚀变内带出现大量的含钙矿物，包括角闪石、斜方辉石、绿帘石和钙铝榴石等[4]。

2 脉状金矿床水/岩反应过程中的元素地球化学

根据平衡计算研究，在大多数中低温（绿片岩相）和高温（≥角闪岩相）脉状金矿中都发生了贵金属元素（Au和Ag）及与其有关的稀有元素（As、Sb、Se、Te、Bi、W、B）、大离子亲石元素（K、Rb、Ba、Li、Cs、Tl）及挥发份（H_2O、CO_2、CH_4、H_2S）的富集，而其它常量元素（如Fe、Mg、Ca、Na）的增加或减少则依赖于容矿围岩的组成。在容矿围岩岩性相同的金矿中，中低温矿床一般表现为钠元素富集或钾交代作用，而高温矿床则为蚀变内带中的钙含量显著增加、钠降低。造成该现象的具体原因目前尚不清楚，但很可能是高温流体中的碱或碱土组份不断地与所流经的围岩发生反应的结果。一般来说，钙在较高温压条件下富集，钠在低温下积聚，而钾在各种温度条件下都可以富集。

国内外脉状金矿床中稀有和贵金属元素组合一般为 Au + Ag + As + Te ± Se ± W ± Mo ± Bi ± B，而 Cu、Pb、Zn 含量较低。元素在热流体中迁移形式可能是造成矿脉中稀有和贵金属元素富集而贱金属元素难以积聚的原因。如金及相关元素与硫极易形成络合物，而贱金属（Cu、Pb、Zn）元素则易与氯形成络合物。与脉状金矿有关的成矿热液一般为低盐度流体，它们不适宜贱金属元素的搬运。即使在同一矿床中，不同地段稀有和贵金属元素含量的变化也非常大，其原因是在不同成矿部位流体物理化学条件及矿质沉淀机制存在着差异。近期研究表明，在高温矿床中 Cu、Pb、Sb、W 富集要比低温矿床大。

3 脉状金矿形成的热液介质条件

3.1 成矿流体性质

尽管成矿时代及地理位置不同，国内外这类金矿的成矿热液都很相似（表 1）。脉状金矿所涉及的成矿热液为H_2O-CO_2-NaCl ± CH_4 ± N_2 ± H_2S型，而矿床中出现的流体包裹体可

表 1 脉状金矿床中成矿流体的温度-压力-成分特征及成矿条件

特 征		说 明
压力	70～410 MPa	一般为 100～300 MPa
温度	160～700℃	与矿化有关的成矿温度一般为 180～350℃
成分		
气相成分	H_2O-CO_2 ± CH_4 ± H_2S ± N_2	X_{CO_2} = 0.05～0.3 随温度和压力升高 CH_4/CO_2 比值趋于增大
液相成分	Na＞K ± Ca ± Mg	
盐度	0%～35% NaCl	一般 ± 6% NaCl eq.，部分矿床中见到高盐包裹体，对其来源认识仍不统一，可能是流体不混溶造成或来源于次生流体
pH	近中性	金活化迁移阶段为碱性，沉淀阶段转至近中性
氧化还原条件	一般为还原环境	受赤铁矿-磁铁矿缓冲对控制；在矿质沉淀部位可发生短时氧化作用
元素富集	亲石元素(K, Rb, Ba, Cs, Tl), S, CO_2; Au, Ag(± As, Sb, W, Sb, Te, Se, Mo, Bi, B)	受容矿围岩成分控制，但一般来说 SiO_2、CO_2、S、K 和大离子亲石元素皆富集，高温下 Ca 富集，低温下 Na 富集；相对于低温矿床来说，高温矿床中更富集 Ag、W、Cu 和 Pb
流体来源	变质来源 ± 岩浆来源 ± 地幔来源 ± 地表水来源	国外脉状金矿(如加拿大 Abitibi 和西澳 Yilgarn)成矿流体主要来源于变质热液(绿岩带脱气作用)；国内脉状金矿(如小秦岭和胶东地区)成矿流体来源于花岗岩浆作用；产于绿岩带周边的脉状金矿中可能有地幔来源流体参与作用；在矿床浅部还可能有地表水的混入
金的搬运形式	硫络合物 氯络合物	绿片岩相矿床中为 $Au(HS)_2^-$，角闪岩相矿床中为 $Au(HS)^0$；砷络合物对金的溶解度有较大影响；高温条件下金为金氯络合物迁移
造成金沉淀的因素	①水/岩反应 ②流体不混溶(相分离) ③流体混染	蚀变岩型脉状金矿中围岩蚀变占主要；石英脉型脉状金矿由压力突然变化造成的流体不混溶(相分离)作用占主要；流体混染(溶)一般发生在近地表矿体

注：据范宏瑞等[1]、Ho 等[6]，Muller 等[7]资料总结

分为 4 类：① 两相或三相 H_2O-CO_2 包裹体；② 富含 CO_2 包裹体，在室温条件下 CO_2 可呈气-液两相或单相(气相或液相)，并可能还含有 CH_4；③ 两相水溶液(液 + 气)包裹体；；④ 高盐度水溶液包裹体。类型①和②包裹体的区别在于，类型①包裹体内水溶液相占的比例较大，加热时均一成液相，而类型②包裹体在室温下 CO_2 相的外侧可有一水溶液相，但该相所占的比例一般很小，常呈薄膜状吸附在包裹体壁上。一般认为，上述②和③类包裹体是由原始均一的流体(①类包裹体)经不混溶后捕获的。需要指出的是，脉状金矿中大部分包裹体都为次生成因，只有少数为原生。次生包裹体能否代表成矿时的热液介质取决于它们被捕获的时间。我们在豫西小秦岭脉状金矿研究中曾发现，自然金微颗粒与次生包裹体沿裂隙平行产出，证明它们为同期生成。由于脉状金矿矿脉一般由破碎带经多次剪切及扩张而形成，因此有相当一部分次生包裹体代表了成矿热液。初始成矿流体的 X_{CO_2} 值为 0.05～0.30(平均 0.15)，CH_4/CO_2 比值可变。而较高的 CH_4 含量则解释成热液与碳酸盐岩围岩反应或流体初始氧化态可能较低。热流体的盐度一般小于 6%NaCl，并且 Na＞K≥Ca≥Mg。部分矿床中见到的第④类高盐度水

溶液包裹体的成因目前仍争论较大，这类包裹体一般为不规则状、次生并切穿早期的包裹体，均一温度也比成矿期的包裹体低 50～100 ℃，所以趋向认为它们是由与矿化无关而又具区域性的 $NaCl\text{-}CaCl_2$ 卤水形成的[5]。与矿化有关的流体包裹体的均一温度为 180～350 ℃，根据富 CO_2 包裹体流体密度(0.7～>1.0 g/cm^3)获得的流体捕获压力为 70～410 MPa(一般 100～300 MPa)，相当于其成矿深度为 3～12 km。

3.2 水/岩反应与金的沉淀成矿

脉状金矿中流体运移通道周围蚀变带(特别是蚀变岩型矿体)内流体-围岩交代蚀变反应是造成热液中金沉积成矿的主要原因，其方式有：

(1) 容矿围岩的硫化物化可能是水/岩反应中造成热液中金沉淀的主要原因，这在国内外许多大型蚀变岩型脉状金矿床中皆有发现。其机理是，成矿热液与运移通道周围的围岩发生反应，形成 Fe-硫化物(黄铁矿等)矿物，从而降低了流体中的 H_2S 含量，而流体中硫(ΣS)的消耗又造成了 Au-S 络合物的不稳定，发生：

$$Au(HS)_2^- + FeO_{(硅酸盐,氧化物)} \longrightarrow Au\downarrow + FeS^2$$

反应。如果该反应是金沉淀成矿的主要原因，那么相关金矿体中金的品位应当与容矿围岩中的总硫含量成正比。值得指出的是，上述反应中围岩中的铁也被消耗掉，造成紧临矿体的蚀变铁镁质硅酸盐要比蚀变外带围岩更加富镁。

(2) 流体-围岩间强烈的钾和 CO_2 交代作用也是造成金沉淀的主要原因，该交代过程造成大量的 H_2 加入到热液中，使得流体的 pH 值降低，流体介质条件迅速变化，从而引起金的沉淀。如果钾和(或)CO_2 交代作用在成矿中占主要，那么流体运移通道(石英脉体)周围蚀变带内金的品位应该与围岩蚀变的强度成正比。

(3) 初始成矿流体与含碳的围岩发生反应可生成大量的甲烷($2C + 2H_2O = CH_4 + CO_2$)，甲烷可造成成矿热液发生还原反应，使得金沉淀。如果该过程占主要的话，可以从脉体碳酸盐矿物的碳同位素组成获得进一步证据。

参 考 文 献

1 范宏瑞，谢奕汉，王英兰. 流体包裹体与金矿床的成矿及勘探评价. 贵金属地质，1997，6(3)：204～213.

2 Ridley J R. Constraints from alteration assemblages on gold-bearing hydrothermal fluid composition and source. In: Gold deposits of the Archean Yilgarn Block, Western Australia: Nature, Genesis and Exploration Guides. The University of Western Australia Publication, 1990, 20: 268～272.

3 Clark M E, Carmichael D M, Hodgson C J etc.. Wall-rock alteration, Victory gold mine, Kambalda, Western Australia: Processes and P-T-X_{CO_2} conditions of metasomatism. In: The Geology of Gold Deposits: the Prospective in 1988, Economic Geology Monograph, 1989, 6: 445～459.

4 Mikucki E J, Ridley J R. The hydrothermal fluid of Archean lode-gold deposits at different metamorphic grades: composition constraints from ore and wallrock alteration assemblages. Mineral. Deposita, 1993, 28: 469～481.

5 Guha J, Kanwar R. Vug brines-fluid inclusions: A key to understanding of secondary gold enrichment processes and the evolution of deep brines in the Canadian Shield. In: Saline Water and Gases in the Crystalline Rocks, 1987, 95～101.

6 Ho S E, Groves D I, McNaughton N J etc.. The source of ore fluids and solutes in Archean lode-gold deposits of Western Australia. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1992, 50: 173～196.

7 Mueller A G, Groves D I, The classification of Western Australian greenstone-hosted gold deposits according to wallrock-alteration mineral assemblages. Ore Geology Review, 1991, 6: 291～331.