



新疆西准噶尔包古图金矿中的自然砷及其矿床成因意义

安芳, 朱永峰*

造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

* 联系人, E-mail: yfzhu@pku.edu.cn

2008-09-08 收稿, 2008-12-19 接受

国家自然科学基金(批准号: 40730314)和国家“十一五”科技支撑计划重点项目(编号: 2006BAB07B08)资助

摘要 自然砷是一种较罕见的矿物, 新疆西准噶尔包古图金矿中大量发育自然砷, 呈它形粒状与梳状石英和辉锑矿共生. 自然砷中 As 含量为 98 wt%~98.7 wt%, 是包古图金矿主要的载金矿物. 银金矿为包古图金矿中最主要的含金矿物, 呈显微粒状存在于自然砷中或与自然砷、辉锑矿和梳状石英共生. 包古图金矿的热液成矿期可划分为 3 个阶段, 自然砷仅形成于主要金矿化阶段(阶段), 该阶段形成的主要矿物组合为自然砷-辉锑矿-银金矿-毒砂-辉锑银矿-银黝铜矿-磁黄铁矿-黄铁矿. 根据自然砷及其共生矿物组合推断包古图金矿主要金矿化阶段的温度为 230~170 °C, $\log fO_2$ 为 -42~-56.5, $\log fS_2$ 为 -13.3~-16.6. 从成矿早期(阶段)到主要金矿化阶段(阶段), 成矿流体的温度和硫逸度明显降低, 伴随 S^{2-} 浓度降低, 砷浓度升高. 包古图金矿中的银金矿与自然砷共生, 且含 As (0.5 wt%~1.3 wt%), 说明成矿热液中 S^{2-} 浓度降低时, 其中溶解的砷增大了金的溶解度. 自然砷结晶促使热液体系中的金沉淀形成包古图金矿.

关键词
自然砷
金矿
包古图
西准噶尔
新疆

砷元素是含金热液体系的组分之一, 含量通常为 1~10 ppm (1 ppm = 1 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 下同), 部分高达 50 ppm^[1]. 尽管如此, 自然界中发育自然砷的金矿床少见报道, 砷主要赋存于毒砂和含砷黄铁矿中. 当热液温度较低, 硫逸度和砷浓度较高时会形成雌黄和雄黄. 实验研究表明, 在碱性热液中, 金的溶解度随热液中砷含量升高而增大^[2], 一些热液金矿中金与含砷矿物含量(含砷黄铁矿和毒砂)正相关^[3-6], 因此认为热液体系中的砷对于金的富集起重要作用^[2,7-10]. 目前除含砷黄铁矿和毒砂外^[10,11], 未见其他富砷矿物(如自然砷, 雌黄, 雄黄等)以主要载金矿物的形式产出.

文献中报道的自然砷主要产于卡林型金矿中, 呈致密块状或脉状与毒砂, 黄铁矿, 雌黄和雄黄伴生, 与金矿化具有密切的成因关系. 在这类矿床中, 自然砷不是载金矿物^[3-6], 金主要以微细自然金的形式赋存在黄铁矿和毒砂中^[10,11]. 石英脉型金矿中发育自然砷的例子非常罕见, 已报道石英脉型金矿中的自

然砷沉淀晚于金矿化, 与金矿化无关^[12]. 本文报道了石英脉型金矿中以主要载金矿物形式产出的自然砷, 并依据自然砷及其共生矿物组合特征, 研究包古图金矿主要金矿化阶段的物理化学条件, 探讨自然砷与金矿化的关系.

1 矿床地质

近几年新疆西准噶尔地区的地质与矿产勘查取得了重要进展^[13-22], 包古图地区的斑岩型铜-金矿勘探工作取得的成就尤其受矿业界关注. 除斑岩铜矿外, 该地区还是重要的金矿和铬铁矿产地(哈图金矿, 宝贝金矿, 萨尔托海金矿和铬铁矿). 西准噶尔地区主要出露下石炭统火山-沉积建造(包古图组, 希贝库拉斯组 and 太勒古拉组, (图 1(a)), 太勒古拉组中酸性凝灰岩的锆石 SHRIMP 年龄为 328 Ma^[23]. 大量中酸性岩浆侵位于下石炭统火山-沉积地层中, 且在达拉布特断裂南北两侧有明显区别(图 1(a)), 北侧主要出

引用格式: 安芳, 朱永峰. 0B 新疆西准噶尔包古图金矿中的自然砷及其矿床成因意义. 科学通报, 2009, 54: 1465-1470

An F, Zhu Y F. Significance of native arsenic in the Baogutu gold deposit, western Junggar, Xinjiang, NW China. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0086-6

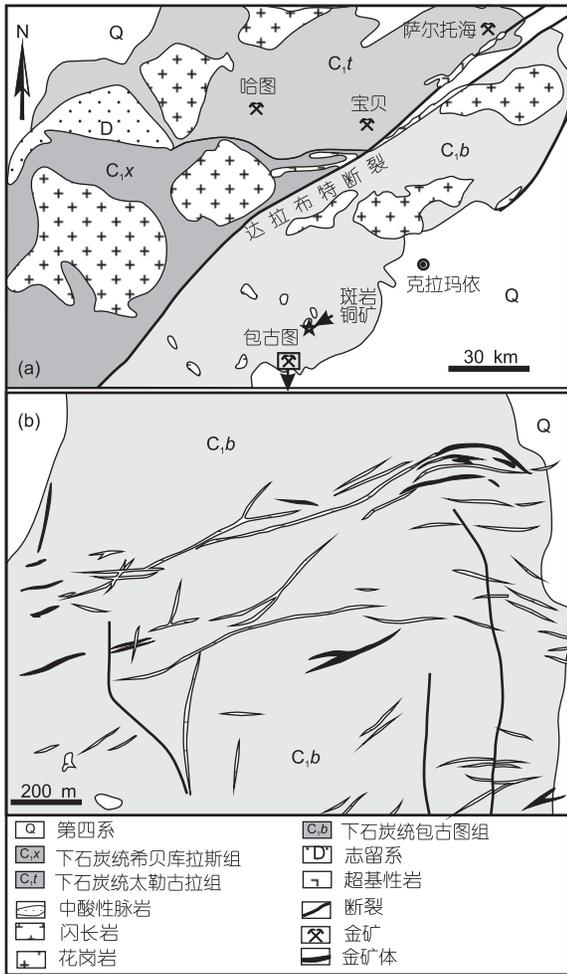


图1 (a) 新疆西准噶尔区域地质略图(据文献[22]); (b) 包古图金矿区地质图(据文献[25], 有修改)

露大型花岗岩基, 侵位时代集中在 295~310 Ma^[24]; 南侧出露花岗闪长斑岩, 石英闪长斑岩岩株和岩脉, 年龄为~322 Ma^[25], 斑岩岩株中多发育斑岩型铜矿化, 铜矿化时代为~310 Ma^[26].

包古图组中的凝灰岩和凝灰质粉砂岩是金矿体的直接赋矿围岩, 普遍发育黄铁矿化, 硅化, 毒砂化, 绢云母化和绿泥石化. 包古图金矿由多条矿脉组成(图 1(b)), 矿脉产状基本稳定. 矿脉在地表延伸总长达 1000 m 以上, 向地下延伸超过 400 m. 矿体以石英脉和石英网脉型为主, 局部呈帚状细脉束群, 矿脉宽度 0.5~3 m 不等(图 1(b)). 不同矿脉的金品位向深部有增高的趋势, 深部部分单个样品的金含量高达 100 g/t 以上.

矿区西部地表出露 7 条矿脉(图 1(b)), 矿脉金品位 6.59~7.49 g/t^[25], 目前通过竖井和地下中段开采. 本文所研究的样品采自包古图金矿矿区(又称为阔个沙也金矿区)西部的地下采矿区(即: 号矿区井下约 300 m, 在 号矿区具代表性. 图 1(b)包括 , 和 号矿区, 号矿区位于图 1(b)的西部, 由 7 条含金石英脉组成, 其他 3 个矿区位于图 1(b)的东部). 石英是矿脉的主要组成矿物, 不同热液阶段形成的石英不同, 早期致密块状石英颗粒细小(0.04~0.1 mm), 晚期梳状石英粒度变化大(0.1~2 mm), 且发育生长环带. 主要矿石矿物为毒砂, 黄铁矿, 自然砷, 银金矿和辉锑矿. 银金矿是主要含金矿物(Au: 70 wt%~75 wt%, 表 1). 含银矿物为银金矿(Ag: 25 wt%~30 wt%), 银黝

表 1 包古图金矿中自然砷及其共生矿物的电子探针分析结果^{a)} (wt %)

| 分析点 | 矿物名称 | S | As | Fe | Ag | Co | Ni | Sb | Cu | Te | Zn | Au | 总和 | 分子式* |
|-------------|------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|--------|---|
| 07HT116-1.3 | 自然砷 | 0.09 | 97.93 | 0 | 0 | 0.01 | 0 | 1.39 | 0 | 0.03 | 0 | 0.02 | 99.47 | As _{0.99} Sb _{0.01} |
| 07HT116-2.1 | 自然砷 | 0.09 | 98.34 | 0 | 0.01 | 0 | 0.02 | 1.98 | 0 | 0.04 | 0.06 | 0 | 100.54 | As _{0.98} Sb _{0.01} |
| 07HT116-3.2 | 自然砷 | 0.03 | 98.70 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 0 | 1.62 | 0 | 0.03 | 0.03 | 0.01 | 100.50 | As _{0.99} Sb _{0.01} |
| 07HT116-4.1 | 自然砷 | 0.02 | 98.49 | 0 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 1.98 | 0.01 | 0 | 0 | 0.05 | 100.61 | As _{0.99} Sb _{0.01} |
| 07HT116-1.1 | 银金矿 | 0 | 1.27 | 0.06 | 24.85 | 0.01 | 0.04 | 0.05 | 0 | 0.13 | 0 | 73.30 | 99.71 | Au _{0.60} Ag _{0.37} As _{0.03} |
| 07HT116-1.2 | 银金矿 | 0 | 0.48 | 0.02 | 24.77 | 0 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 0.12 | 0 | 74.27 | 99.74 | Au _{0.61} Ag _{0.37} As _{0.01} |
| 07HT116-3.1 | 银金矿 | 0.02 | 0.52 | 0.01 | 25.34 | 0.02 | 0.02 | 0.08 | 0 | 0.09 | 0 | 73.36 | 99.46 | Au _{0.60} Ag _{0.38} As _{0.01} |
| 07HT116-5.4 | 银金矿 | 0 | 0.49 | 0 | 29.18 | 0 | 0.04 | 0.05 | 0.02 | 0.15 | 0 | 70.20 | 100.13 | Au _{0.56} Ag _{0.43} As _{0.01} |
| 07HT116-5.1 | 辉锑银矿 | 21.40 | 1.73 | 0.03 | 34.56 | 0 | 0 | 40.80 | 1.25 | 0 | 0.11 | 0.03 | 100.01 | (Ag _{1.87} Cu _{0.12} Zn _{0.01}) _{2.00} (Sb _{1.96} As _{0.14}) _{2.10} S _{3.90} |
| 07HT116-5.2 | 银黝铜矿 | 24.63 | 3.37 | 2.15 | 10.98 | 0.02 | 0 | 23.55 | 30.56 | 0 | 4.97 | 0.32 | 100.55 | (Cu _{8.18} Ag _{1.73} Au _{0.03} Zn _{1.29} Fe _{0.65} Co _{0.01}) _{11.89} (Sb _{3.29} As _{0.77}) _{4.06} S _{13.06} |
| 07HT116-5.3 | 银黝铜矿 | 25.24 | 3.85 | 2.48 | 10.25 | 0.02 | 0.01 | 21.99 | 31.49 | 0 | 4.53 | 0 | 99.86 | (Cu _{8.33} Ag _{1.60} Zn _{1.17} Fe _{0.75} Co _{0.01} Mn _{0.01}) _{11.87} (Sb _{3.04} As _{0.86}) _{3.90} S _{13.24} |

a) 样品由北京大学地球与空间科学学院电子探针实验室分析, 仪器为 JEOL JXA-8100, 电子束直径 1 μm, 加速电压 20 kV, 束流 1×10⁻⁸ A. *, 原子数<0.005 的元素不计入分子式, 自然砷和银金矿以总原子数为 1 计算, 辉锑银矿和银黝铜矿分别以 8 和 29 计算

铜矿(Ag: ~11 wt%)和辉锑银矿(Ag: ~35 wt%, 表 1).

2 矿化阶段

岩相学研究表明, 包古图金矿的热液成矿期可以划分为 3 个阶段:

阶段 : 该热液阶段在围岩中形成浸染状石英和绢云母或不含矿的石英脉, 石英为致密块状, 粒度相对较小(0.04~0.1 mm, 图 2(a)), 伴随形成大量自形-半自形黄铁矿和毒砂(图 2(a)~(c)).

阶段 : 形成较粗大的含矿石英脉(图 2(d)~(e)), 矿石矿物主要为自然砷, 辉锑矿, 银金矿(图 2(d)~(g), (k)~(m))以及少量毒砂, 磁黄铁矿和黄铁矿, 其中自然砷的含量最高(达 80%). 石英主要呈梳状构造沿硅化围岩的裂隙生长(图 2(d)~(e)), 梳状石英常发育生长环带, 环带通过包裹大量显微自然砷和阳起石颗粒显示出来, 从颗粒内部向边部表现出石英-石英+自然砷+阳起石-石英-石英+自然砷+阳起石的韵律(图 2(h)~(j)), 这种韵律表明阶段 成矿热液中砷和铁含量的周期性变化. 在梳状石英的外围常见方解石与毒砂, 磁黄铁矿和黄铁矿共生. 毒砂自形程度较高, 粒度变化大(0.05~0.1 mm). 脉体中发育少量银黝铜矿和辉锑银矿, 共存于自然砷中. 辉锑银矿含 21.4 wt% S, 34.56 wt% Ag, 40.8 wt% Sb 和少量 As (1.73 wt%), Cu (1.25 wt%, 表 1). 银黝铜矿中除 Cu, Ag, Sb 和 S 外, 含 4 wt%~5 wt% Zn 和 2.2 wt%~2.5 wt% Fe (表 1). 该阶段是主要的金沉淀阶段, 形成的金矿物以银金矿为主, 含 Au 70 wt%~75 wt%, Ag 25 wt%~30 wt%和少量 As (0.5 wt%~1.3 wt%, 表 1). 银金矿呈显微粒状(1~10 μm)存在于自然砷中(图 2(k)), 或呈细粒它形(10~100 μm)与自然砷, 辉锑矿, 梳状石英共生(图 2(l)~(m)).

阶段 : 形成方解石脉, 其中含少量毒砂, 磁黄铁矿和辉锑矿.

3 自然砷

包古图金矿矿石中自然砷的新鲜断面呈锡白色, 具有强金属光泽, 不透明, 极易氧化, 在空气中迅速失去金属光泽而转变为灰褐色, 灰黑色或深灰色(图 2(d)). 手标本中自然砷呈参差状断面, 表面常见擦痕. 在显微镜下观察发现, 随着反射光强度从高到低, 自然砷表现为微带粉褐色的灰白色-粉褐色反射色(图 2(f), (k), (m)), 被氧化的自然砷呈灰褐色反射色(图 2(l)). 自然砷具有强非均质性, 棕色-浅灰色或淡绿

灰色多色性. 包古图金矿中的自然砷形成于主要金成矿阶段(阶段), 在该阶段形成的脉体中自然砷含量高达 15 vol %, 与梳状石英共生(图 2(d)~(e)). 自然砷一般为它形粒状, 粒度变化很大(<0.001~2 mm), 部分显微粒自然砷颗粒(<1 μm)与阳起石共生, 显示出石英的生长环带(图 2(h)~(j)).

与自然砷伴生的主要金属矿物为辉锑矿和银金矿, 常见自然砷与长柱状或针状辉锑矿共生(图 2(f)). 包古图金矿矿石中自然砷含量与金含量呈正相关性. 对银金矿的统计分析表明, 以自然砷为主要载体矿物(存在于自然砷中或与自然砷共生)的银金矿约占一半(其他银金矿与辉锑矿和梳状石英共生), 表明包古图金矿中自然砷与金矿化之间的密切关系. 电子探针分析表明, 自然砷中 As 的质量分数达 98%~98.7%, 并含少量 Sb (1.4 wt%~2.0 wt%)和微量 S, Fe, Ag, Co, Ni, Te 和 Au (<0.01 wt%, 表 1).

4 讨论

4.1 物理化学条件

流体包裹体研究^[25]显示, 包古图金矿的矿化温度为 170~350 . 自然砷在 $\log f\text{O}_2$ - T 图中的稳定区域表明, 自然砷形成的温度不超过 230 ^[27], 由此推断主要金成矿阶段(阶段)矿化温度的最大范围为 170~230 , 进而可以确定该阶段矿物组合在 $\log f\text{O}_2$ - T 图中的稳定区域, 并获得 $\log f\text{O}_2$ 值为-42~-56.5 (图 3(a)). 依据所获得的 $\log f\text{O}_2$ 值(-42~-56.5), 确定阶段 矿物组合(自然砷-辉锑矿-毒砂-磁黄铁矿-黄铁矿)在 $\log f\text{O}_2$ - $\log f\text{S}_2$ 图中的稳定区域, 并获得阶段 成矿流体的 $\log f\text{S}_2$ 值为-13.3~-16.6(图 3(b)), 其上下界线分别由雄黄和自然砷的稳定共生线以及磁黄铁矿与黄铁矿的稳定共生线来限定.

根据流体包裹体数据^[25]和阶段 的温度上限, 推断包古图金矿成矿阶段 的温度为 230~350 . 阶段 稳定矿物组合为毒砂-黄铁矿, 250 时毒砂和黄铁矿在 $\log f\text{S}_2$ 值为-12.1~-12.8 范围内稳定共生. 随着温度升高, 毒砂和黄铁矿稳定共生所需的 $\log f\text{S}_2$ 值增大^[8,28], 说明阶段 的 $\log f\text{S}_2$ 值 -12.1~-12.8. 从阶段 到阶段 成矿流体的硫逸度显著降低($\log f\text{S}_2$ 值从-12.1 降低至-16.6). 伴随成矿流体中 S^{2-} 浓度的降低, 阶段 脉体中金属硫化物相对含量显著减少, 形成大量阳起石和少量含铁硫化物(毒砂, 黄铁矿和磁黄铁矿), 这说明阶段 成矿流体中的铁主要赋

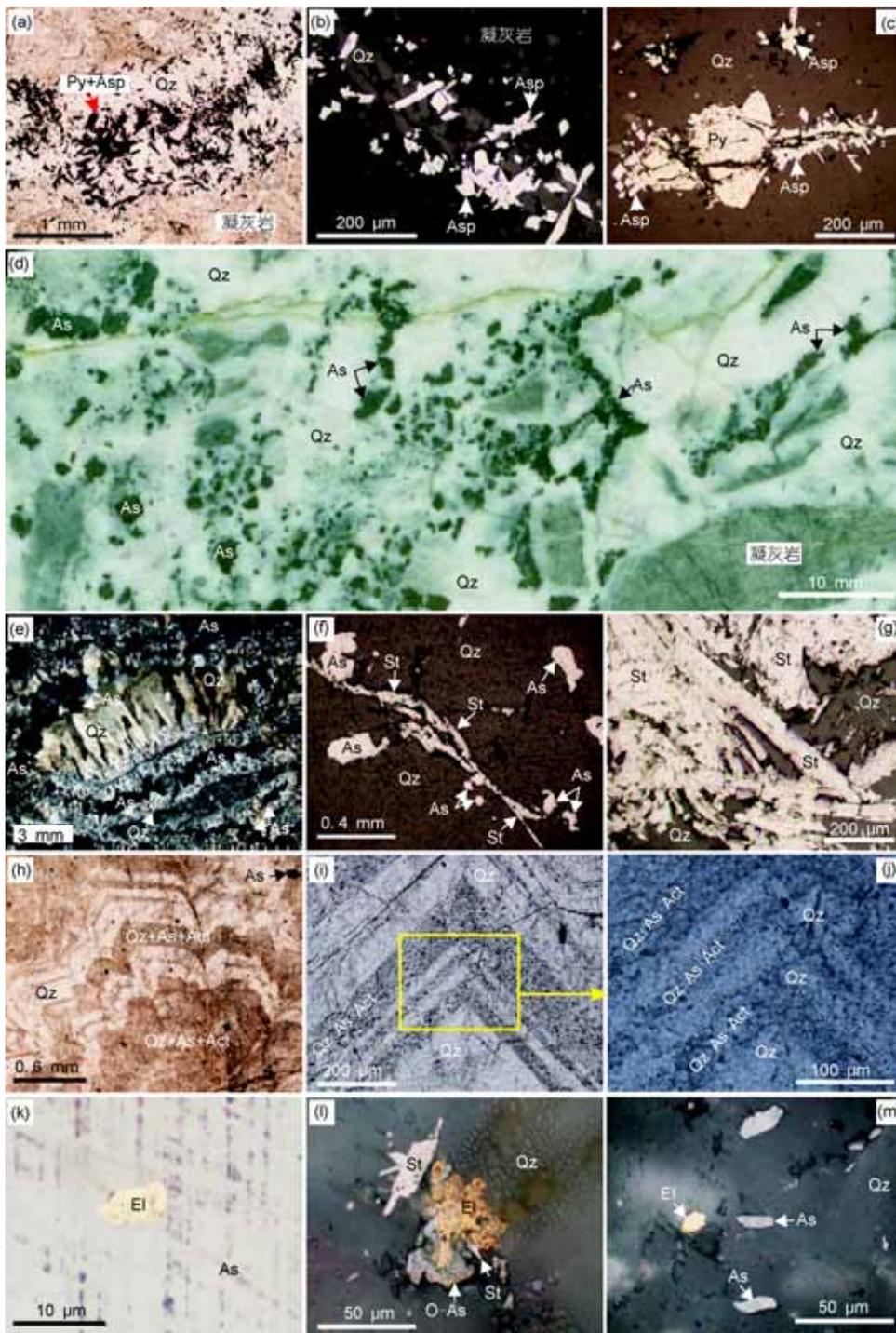


图2 包古图金矿中主要矿石矿物的产出形式

(a) 阶段 形成的石英, 黄铁矿和毒砂, 单偏光; (b) 阶段 形成的位于凝灰岩中的毒砂-石英脉, 反射光; (c) 阶段 石英脉中共生的黄铁矿和毒砂, 反射光; (d) 矿石光面中氧化为灰褐色或灰黑色的自然砷; (e) 自然砷与梳状石英共生, 正交偏光; (f) 自然砷与辉锑矿共生, 反射光; (g) 柱状及针状辉锑矿集合体, 反射光; (h)~(j) 石英的生长环带, 其中见自然砷和阳起石, 其含量的变化构成了石英的韵律生长环带, 单偏光; (k) 银金矿呈微粒状存在于自然砷中, 反射光; (l) 银金矿与辉锑矿, 自然砷和石英共生, 自然砷表面被氧化, 反射光; (m) 在梳状石英中共生的银金矿与自然砷, 反射光。Act, 阳起石; As, 自然砷; Asp, 毒砂; El, 银金矿; O-As, 表面氧化的自然砷; Py, 黄铁矿; Qz, 石英; St, 辉锑矿

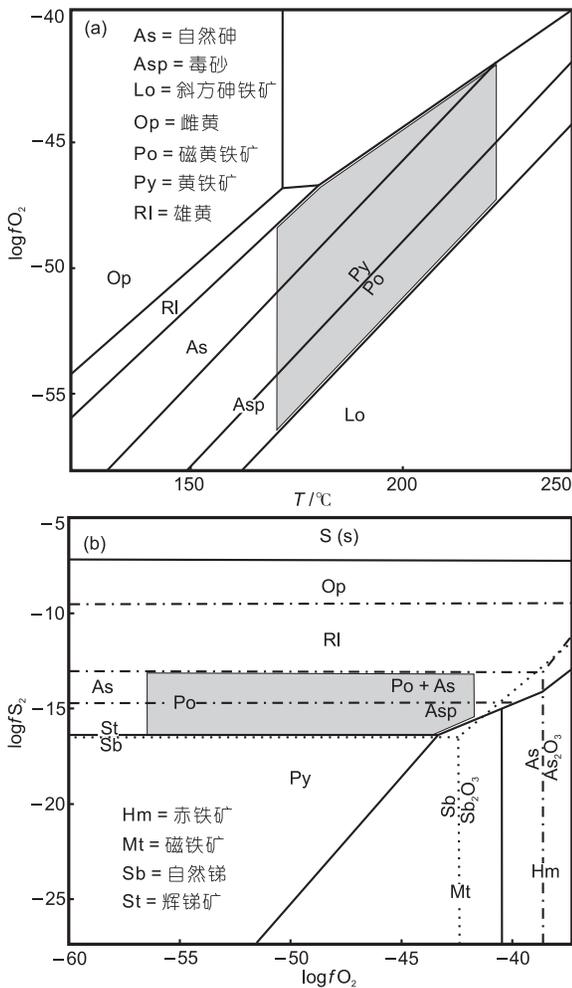


图 3

(a) 阶段 矿物组合在 $\log fO_2$ - T 图中的稳定区域(底图据文献[27]);
 (b) 阶段 矿物组合在 $\log fO_2$ - $\log fS_2$ 图($T = 200$)中的稳定区域
 (底图据文献[6])

存于阳起石中。阶段 脉体中高含量的自然砷和辉锑矿表明此时成矿流体中砷和锑的浓度较高。此阶段形成的银金矿含 0.5 wt%~1.3 wt% As, 自然砷含 1.4 wt%~2.0 wt% Sb 且基本不含硫(表 1)。

4.2 自然砷与金矿化的关系

银金矿是包古图金矿的主要含金矿物, 其中含 0.5 wt%~1.3 wt% As, 主要存在于自然砷中或与自然砷共生。矿石中金含量与自然砷含量呈正相关性。包古图金矿成矿流体演化早期(阶段)沉淀了大量毒

砂和黄铁矿(图 2(a)~(c)), 导致成矿流体中 S^{2-} 浓度显著降低。成矿流体中的金主要以金硫络合物形式迁移, 且流体中 S^{2-} 浓度降低会导致金硫络合物分解和金沉淀[29~32], 但阶段 流体中 S^{2-} 浓度显著降低并未引起金沉淀。金与自然砷在阶段 同时结晶, 形成银金矿赋存于自然砷中或与自然砷紧密共生的现象。这说明成矿流体中 S^{2-} 浓度强烈降低后, 溶解于其中的砷开始对增大金的溶解度起作用, 这与前人通过实验研究获得的结果一致[2], 即 S^{2-} 浓度较低流体中的砷可以增大金的溶解度, 砷溶解度降低导致流体中的金沉淀。

随着成矿流体物理化学条件的变化(如温度降低, pH 变化), 砷溶解度降低结晶出自然砷, 引起金溶解度降低, 并使流体中的金过饱和而结晶形成银金矿。在~200 条件下, 辉锑矿和自然砷沉淀所需的硫逸度明显低于雌黄和雄黄, 由于阶段 成矿流体的硫逸度较低($\log fS_2 = -13.3 \sim -16.6$, 图 3(b)), 不能形成砷硫化物(如雌黄和雄黄), 仅结晶出大量自然砷和辉锑矿(图 3(b))。基本同时结晶的辉锑矿, 银金矿, 辉锑银矿和银黝铜矿与自然砷伴生或共生。之后热液中残存的砷和硫与少量铁结合形成毒砂, 磁黄铁矿和黄铁矿, 即本文在阶段 观察到的自然砷-辉锑矿-银金矿-毒砂-辉锑银矿-银黝铜矿-磁黄铁矿-黄铁矿组合。

5 结论

包古图金矿中的自然砷主要呈它形粒状, 显微自然砷颗粒与阳起石和梳状石英共生, 构成石英的生长环带。自然砷是主要的载金矿物, 仅在主要金矿化阶段(阶段)形成, 矿石中自然砷含量与金含量呈正相关性。阶段 共生矿物组合(自然砷-辉锑矿-银金矿-毒砂-辉锑银矿-银黝铜矿-磁黄铁矿-黄铁矿)表明, 包古图金矿主要金矿化阶段(阶段)的温度为 170~230 , $\log fO_2$ 为-42~-56.5, $\log fS_2$ 为-13.3~-16.6。从阶段 到阶段 , 成矿流体的硫逸度和 S^{2-} 浓度显著降低, 而砷和锑的浓度逐渐升高。成矿热液中 S^{2-} 浓度较低时, 其中溶解的砷有助于提高金的溶解度。本文的工作发现, 由于自然砷结晶所导致成矿热液体系中砷含量的降低是促使金沉淀成矿的重要机制。

致谢 匿名审稿专家提出的具体意见和建议对我们正确认识自然砷与金矿化的关系有很大帮助; 包古图铜矿张锐和张云孝先生在野外工作期间提供了诸多便利, 舒桂明老师协助完成了电子探针测试, 徐新, 王煜, 谭娟娟和薛云兴参加了野外工作, 特此感谢。

参考文献

- 1 Ballantyne J M, Mooke J N. Arsenic geochemistry systems. *Geochim Cosmochim Acta*, 1988, 52: 474—483
- 2 Grigoryeva T A, Sukneva L S. Effects of sulfur and of antimony and arsenic sulfide on the solubility of gold. *Geochem Int*, 1981, 18: 153—158
- 3 God R, Zemann J. Native arsenic-realgar mineralization in marbles from Saualpe, Carinthia, Austria. *Mineral Petrol*, 2000, 70: 37—53 [DOI](#)
- 4 姚治国. 砷矿物可作为卡林型金矿中金沉淀的标志. *桂林冶金地质学院学报*, 1988, 6: 254
- 5 谭运金. 卡林型金矿床中的自然砷. *矿床与地质*, 2001, 15: 699—704
- 6 刘家军, 杨丹, 刘建明, 等. 卡林型金矿床中自然砷的特征与成矿物理化学条件示踪. *地学前沿*, 2007, 14: 158—166
- 7 Spycher N F, Reed M H. Evolution of a broadlands-type epithermal ore fluid along alternative P-T paths: Implications for the transport and deposition of base, precious and volatile metals. *Econ Geol*, 1989, 84: 328—359 [DOI](#)
- 8 Simon G, Kesler S E, Chryssoulis S L. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks, Nevada: Implications for deposition of gold in Carlin-type deposits. *Econ Geol*, 1999, 94: 405—422 [DOI](#)
- 9 Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S, et al. Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochim Cosmochim Acta*, 2005, 69: 2781—2796 [DOI](#)
- 10 Benzaazoua M, Marion P, Robaut F, et al. Gold-bearing arsenopyrite and pyrite in refractory ores: Analytical refinements and new understanding of gold mineralogy. *Mineral Mag*, 2007, 71: 123—142 [DOI](#)
- 11 Simon G, Huang H, Penner-Hahn J E, et al. Oxidation state of gold and arsenic in gold-bearing arsenian pyrite. *Am Mineral*, 1999, 84: 1071—1079
- 12 Goldfarb R J. The late Cretaceous Doulin Creek gold deposit, Southwestern Alaska: control on epithermal ore formation. *Econ Geol*, 2004, 99: 643—671 [DOI](#)
- 13 张锐, 张云孝, 佟更生, 等. 新疆西准包古图地区斑岩铜矿找矿的重大突破及意义. *中国地质*, 2006, 33: 1354—1360
- 14 张连昌, 万博, 焦学军, 等. 西准包古图含铜斑岩的埃达克岩特征及其地质意义. *中国地质*, 2006, 33: 626—631
- 15 徐新, 何国琦, 李华芹, 等. 克拉玛依蛇绿混杂岩带的基本特征和锆石 SHRIMP 年龄信息. *中国地质*, 2006, 33: 470—475
- 16 何国琦, 朱永峰. 中国新疆及其邻区地质矿产对比研究. *中国地质*, 2006, 33: 451—460
- 17 朱永峰, 王涛, 徐新. 新疆及邻区地质与矿产研究进展. *岩石学报*, 2007, 23: 1785—1794
- 18 朱永峰, 何国琦, 安芳. 中亚成矿域核心区地质演化与成矿规律. *地质通报*, 2007, 26: 1167—1177
- 19 朱永峰, 徐新, 魏少妮, 等. 西准噶尔克拉玛依 OIB 型枕状玄武岩地球化学及其地质意义研究. *岩石学报*, 2007, 23: 1739—1748
- 20 朱永峰, 徐新. 西准噶尔白碱滩二辉橄岩中两种辉石的出溶结构及其地质意义. *岩石学报*, 2007, 23: 1075—1086
- 21 Zhu Y F, Zhou J, Zeng Y S. The Tianger (Bingdaban) shear zone hosted gold deposit, west Tianshan, NW China: Petrographic and geochemical characteristics. *Ore Geol Rev*, 2007, 32: 337—365 [DOI](#)
- 22 安芳, 朱永峰. 新疆哈图金矿蚀变岩型矿体地质和地球化学研究. *矿床地质*, 2007, 26: 621—633
- 23 王瑞, 朱永峰. 西准噶尔宝贝金矿地质与容矿火山岩的锆石 SHRIMP 年龄. *高校地质学报*, 2007, 13: 590—602
- 24 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂直生长(1): 后碰撞深成岩浆活动的时限. *岩石学报*, 2006, 22: 1077—1086
- 25 沈远超, 金成伟. 西准噶尔地区岩浆活动与金矿化作用. 北京: 科学出版社, 1993. 46—50
- 26 宋会侠, 刘玉琳, 屈文俊, 等. 新疆包古图斑岩铜矿矿床地质特征. *岩石学报*, 2007, 23: 1981—1988
- 27 Heinrich C A, Eadington P J. Thermodynamic predictions of the hydrothermal chemistry of arsenic and their significance for the paragenetic sequence of some cassiterite-arsenopyrite-base metal sulfide deposit. *Econ Geol*, 1986, 81: 511—522 [DOI](#)
- 28 Barton P B, Skinner B J. Sulfide mineral stabilities. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: Wiley Interscience, 1979. 278—403
- 29 Berndt M E, Buttram T, Earley D, et al. The stability of gold polysulfide complexes in aqueous sulfide solutions: 100 to 150°C and 100 bars. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58: 587—594 [DOI](#)
- 30 Benning L G, Seward T M. Hydrosulphide complexing of Au(I) in hydrothermal solutions from 150—400°C and 500—1500 bar. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 1849—1871 [DOI](#)
- 31 Hayashi K, Ohmoto H. Solubility of gold in NaCl- and H₂S-bearing aqueous solutions at 250—350°C. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55: 2111—2126
- 32 Zhu Y F, Jiang N, Zeng Y S. Geochemistry of the ore-forming fluids in gold deposits from the Taihang Mountains, Northern China. *Int Geol Rev*, 2001, 43: 457—473