

Carlin 型金矿床的流体包裹体研究

Carlin 型金矿床不同成矿阶段矿物组合的流体包裹体和氢、氧同位素研究可以使我们推断成矿时的物理化学条件, 鉴别成矿流体的挥发性成分和潜在的流体源以及推测成矿的深度。样品分别取自美国内华达州的北部 Getchell 矿床周围的地表、采坑的钻孔岩心和 Meikle、Betze/Post 矿床。

关键词 Carlin 型金矿床 流体包裹体 成分 氢氧同位素 成矿物理化学条件

1 矿物共生组合

1.1 成矿前的矿物组合为黄铁矿-石英脉

石英脉中的黄铁矿是粗粒的, 在反射光下磨光面平滑、高突起, 其化学组成基本上是纯的铁和硫, 缺少其他微量元素。黄铁矿颗粒通常碎裂并被重新胶结。共生的石英也是粗粒的, 碎裂并为后期矿物所胶结。

1.2 主成矿阶段的矿物组合为金 + 富砷黄铁矿/白铁矿 + 碧玉状石英 ± 雌黄 ± 萤石

细粒的黄铁矿和白铁矿在较粗粒的黄铁矿的核上形成狭窄的、1~5 μm 宽的环边, 并富集了砷和金, 有时在某些硫化物颗粒形成内带。这些黄铁矿在反射光下抛光面不怎么平滑, 低突起。在这些带中 2wt%~4wt% 的砷大约相当于 $(50 \sim 160) \times 10^{-6}$ 的金。

成矿阶段的黄铁矿/白铁矿一般被封闭在网状的(含半自形-自形的石英晶体的)碧玉状石英中。网状结构表明溶解和交代不是同时的, 以及开放空间持续了一段时期使晶面得以形成。

与碧玉状石英和成矿阶段铁的硫化物共生的是萤石。在开放空间充填的自形的晶体呈带状生长, 从明亮的核变为紫色的环边。有意义的是, 少量自形的石英晶体、成矿阶段的铁-硫化物和雌黄颗粒, 在共生的萤石中勾划出生长带的外形, 组成了砷矿物、含砷矿物和金的组合。

1.3 晚期成矿阶段的矿物组合为雄黄 + 方解石 ± 黄铁矿 ± 金

雄黄和方解石充填或部分充填较早期组合的孔隙和裂隙。少量雄黄沿碧玉状矿石带的边缘包围了成矿阶段的黄铁矿颗粒。粗大而透明的方解石生长在雄黄和其他早期形成的矿物之上, 并充填了许多残留的开放空间。另有少量辉锑矿和重晶石呈放射状结晶。

1.4 成矿后的矿物组合为方解石

透明闪亮的方解石晶体和脉体部分充填残余的孔隙。

2 流体包裹体分类

原生包裹体主要存在于晶体的生长带或与固体包裹体连生。在石英、萤石和方解石中均

收稿日期: 1998年11月27日

有发现。

次生包裹体沿愈合的裂隙面呈定向排列。肯定的次生包裹体是少量的,仅存在于石英和萤石中。

假次生包裹体存在于一些石英晶体内,这些包裹体呈面状排列,并局限在一个晶体或生长带的范围内。

不能明显划归原生、次生或假次生的包裹体则归为成因不明的。石英、雄黄和方解石中许多包裹体是成因不明的。

3 流体包裹体显微测温

3.1 主成矿组合的流体包裹体

主成矿阶段石英中捕获的所有的包裹体几乎都是两相富液体包裹体,直径小于 $2\mu\text{m}$,以水溶液占优势,某些包裹体有少量气体。

原生包裹体具有相当一致的均一化温度和流体盐度。成矿阶段石英生长带中大部分包裹体冰融化温度为 $-1.7 \sim -2.9^\circ\text{C}$,表明流体盐度为 $(2.9\sim 4.8)\text{wt}\%$ 当量 NaCl。均一化温度为 $170 \sim 210^\circ\text{C}$ 。同样晶体中的次生和成因不明的包裹体的盐度高达 $8.5\text{wt}\%$ 当量 NaCl,表明晚期有含盐度更高的流体。

碧玉状石英中成因不明的大部分包裹体的冰融化温度为 $-2.1 \sim -5.5^\circ\text{C}$,表明其盐度为 $(3.6\sim 8.6)\text{wt}\%$ 当量 NaCl,均一化温度为 $140 \sim 250^\circ\text{C}$ 。

成矿阶段碧玉状石英中还存在少量直径达 $5\mu\text{m}$ 的暗色富气包裹体。这种包裹体有狭窄的凹角,其中积聚了少量液体。冷冻时,这种液体在 -58°C 时融化,表明这种包裹体中的主要流体是 CO_2 。

上述数据表明,石英中捕获的成矿流体主要是低盐度的水溶液流体。冷冻时偶然观察到笼状物和存在富 CO_2 气包裹体表明, CO_2 也可以是成矿流体的一种组分。由于液体包裹体中未见独立的 CO_2 相,溶解在流体中的 CO_2 小于 $4\text{mol}\%$ 。少量富 CO_2 气相包裹体表明,当流体向上运移至低压条件下有少量 CO_2 从流体中沸腾出来。

在萤石中存在液态和气态 CO_2 及液态 H_2O 的三相包裹体。 CO_2 冰融化温度为 $-56.6 \sim -57.1^\circ\text{C}$,笼状物融化温度接近 $+10^\circ\text{C}$,表明流体仅含 H_2O 和 CO_2 。加热时, CO_2 相一般在 $29\sim 30^\circ\text{C}$ 时均一化为气相,表明整个 CO_2 密度为 $0.31 \sim 0.34\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。全部均一化为气相的温度为 $250 \sim 270^\circ\text{C}$ 。把这些数据代入 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 状态方程,数字计算表明,捕获这种流体的最小封闭压力可达 $400 \times 10^5\text{Pa}$ 。

3.2 晚期成矿组合的流体包裹体

雄黄中有暗色的次生或未知成因的包裹体,包裹体壁有内反射。几乎所有的包裹体含单一的流体相。

晚期方解石的生长带中常见原生的和未知成因的包裹体。这两类包裹体中相的比例不固定且变化很大,形态又不规则,大小变化很大,包裹体的大小显然与气相的份数无关。此外,常见看上去是“空的”包裹体。这些特征表明,包裹体是在晶体生长带沉淀或裂隙愈合时由包裹体颈缩形成的,温度可能低于 200°C 。

4 流体包裹体气体分析

流体包裹体的挥发性组分分析结果列于表1。成矿前的中生代石英脉的包裹体捕获了好几种流体,有各种成分, H₂O-气体比例变化大,一般以 H₂O 或 CO₂ 为主,有些样品中以 CH₄ 为主。在大部分包裹体中发现了痕量-中等的 N₂ 和 H₂S。

成矿阶段矿物的大部分包裹体以 H₂O 为主; CO₂ 是主要的气体,普遍存在少量 H₂S 以及少量-痕量 CH₄、短链烃和 N₂。

萤石中的两相富液体和两相或三相富气体包裹体表明有 H₂O 为主和 CO₂ 为主的两类包裹体,这是流体不混溶造成的。

雌黄中的包裹体流体含大致等量的 H₂O 和 CO₂, 少量 N₂、CH₄、短链烃和 H₂S。

上述分析结果反映出几近等当量的 H₂O 和 CO₂, 表明成矿阶段有 H₂S 为主和 CO₂ 为主两类包裹体。

晚期成矿阶段的雄黄和方解石的包裹体流体以 H₂O 为主, 含少量 CO₂、N₂ 短链烃和痕量 H₂S。即晚期成矿阶段的流体 CO₂ 浓度较低。

表1 四极场质谱计(QMS)分析的包裹体成分

阶段	矿物	H ₂ O	CO ₂	ΣHC	N ₂	H ₂ S
成矿前	石英	89 ~ 95	3 ~ 10	0 ~ 0.5	2	痕量
	石英	57 ~ 81	15 ~ 40	0 ~ 6	1 ~ 7	0 ~ 痕量
	石英	3 ~ 49	8 ~ 53	21 ~ 50	0 ~ 9	1 ~ 4
主成矿	萤石	3 ~ 91	7 ~ 89	痕量	0.2 ~ 8	0.1 ~ 1
	石英	80 ~ 100	0 ~ 16.5	0 ~ 1.4	0 ~ 2.3	0.1 ~ 0.4
	雌黄	44 ~ 61	30 ~ 45	4.5 ~ 8	2 ~ 4	0.2 ~ 0.4
晚期成矿	雄黄	95 ~ 99	1 ~ 4	0 ~ 3	0 ~ 0.3	0 ~ 0.9
	方解石	64 ~ 99	1 ~ 36	痕量 ~ 5.6	0 ~ 3.6	0 ~ 0.2
成矿后	方解石	97.5 ~ 99.5	0.5 ~ 2.5			

成矿后方解石的包裹体流体以 H₂O 为主,而且几乎近于纯水。

4.1 成矿流体的演化

从上述分析结果可以看出,从早期至晚期组合包裹体所捕获的流体是不同的。成矿前的流体有富 H₂O、富 CO₂ 和富 CH₄, 均含一定量的 N₂; 主成矿阶段的流体 H₂O 和 CO₂ 几近等当量, 并含少量 H₂S; 晚期成矿阶段的流体以 H₂O 为主, CO₂ 被稀释; 成矿后的流体全部是 H₂O。

5 成矿流体的氢、氧同位素

为了解释热液流体中水的来源与演化历史,分析了成矿每个阶段流体的 δD_{H₂O} 和 δ¹⁸O_{H₂O} 的组成(图1)。成矿前中生代石英的 δD_{H₂O} 和 δ¹⁸O_{H₂O} 值位于岩浆水和变质水范围内或在其之下。主成矿阶段矿物的流体从岩浆水和变质水范围附近较高的 δD_{H₂O} 和 δ¹⁸O_{H₂O} 值延续到接近水-岩交换曲线的较低的 δD_{H₂O} 值。晚期成矿阶段和成矿后的流体一般比主成矿阶段流体有较低的同位素值。

成矿前石英的包裹体流体的 δD_{H₂O} 值为 -58‰ ~ -96‰, 与岩浆流体相吻合。主成矿阶段

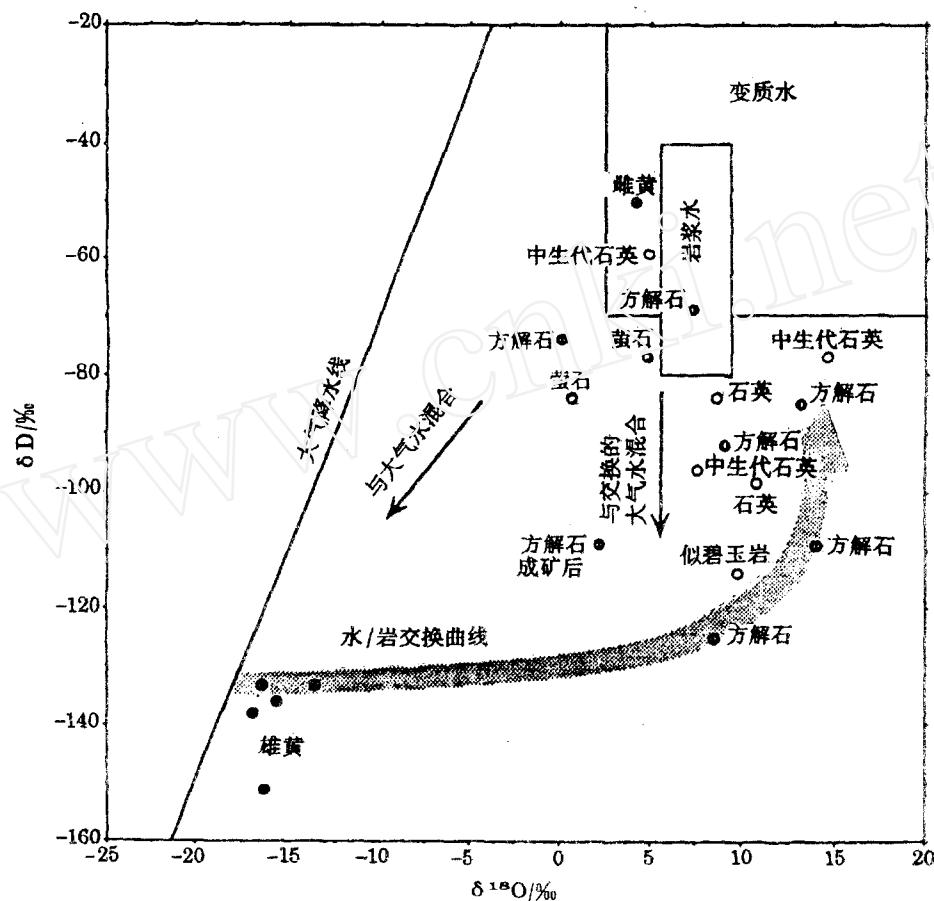


图1 Getchell 矿床成矿前、成矿期和成矿后矿物捕获的包裹体流体的氢、氧同位素

的石英、萤石和雄黄的包裹体流体的 δD_{H_2O} 值 ($-50\text{‰} \sim -97\text{‰}$) 和 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值 ($+12\text{‰} \sim 0\text{‰}$) 最高。晚期成矿阶段的雄黄的包裹体流体的 δD_{H_2O} 值 ($-133\text{‰} \sim -151\text{‰}$) 和 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值 ($-13.6\text{‰} \sim -17.0\text{‰}$) 最低, 接近大气降水线。晚期成矿阶段方解石的包裹体流体的 δD_{H_2O} 值为 $-69\text{‰} \sim -125\text{‰}$, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为 $14\text{‰} \sim 2\text{‰}$ 。

每个共生组合中的矿物有类似的同位素特征, 而不同的组合表现出不同的特征。值得注意的是, 主成矿阶段的流体的 δD_{H_2O} 和 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值高, 表明成矿流体来源于深部, 可以是变质流体, 也可以是岩浆流体, 或两者兼而有之。其同位素值的范围可以用深源流体与各种交换的大气水之间的混合来解释。晚期成矿阶段方解石流体的 δD_{H_2O} 值比主成矿阶段流体的值更低, 反映了成矿流体更多地被交换的大气水所稀释。成矿后方解石流体的 δD_{H_2O} 和 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值与晚期成矿阶段方解石流体的范围相似, 反映了晚期的方解石和捕获的流体是在含金热液体系的衰退期形成的。雄黄的流体的 δD_{H_2O} 和 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值明显小于其他矿物所测定的值, 因为雄黄中包裹体大部分是次生的, 仅含有单一相, 这低值可能代表冷的大气水在矿石形成之后进入成矿系统。

6 成矿的物理化学条件

在 Meikle 和 Betze/Post 矿床, 金成矿阶段石英中水溶液包裹体的盐度 $\leq 10\text{wt}\%$ 当量 NaCl。Meikle 矿床富 H_2O 包裹体在 $200 \sim 225^\circ\text{C}$ 均一化为液态, 富 CO_2 包裹体在 $19.5 \sim 25.4^\circ\text{C}$ 均一化为液态 CO_2 ; Betze/Post 矿床富 H_2O 包裹体在 $150 \sim 180^\circ\text{C}$ 和 $200 \sim 210^\circ\text{C}$ 均一化为液态, 富 CO_2 包裹体在 $10.6 \sim 20^\circ\text{C}$ 均一化为液态 CO_2 。

6.1 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系的不混溶性

图 2 说明 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系在不同压力和不同 CO_2 组分的摩尔百分比浓度下的不混溶性。每一条等温线所围的区域表示两个不相混溶的流体是稳定的; 虚线等温线表示 225°C 。例如, 在 $1\,000 \times 10^5\text{Pa}$ 压力下, CO_2 浓度在 $0.1\text{mol}\% \sim 0.77\text{mol}\%$ 的流体会分离为不混溶的富 CO_2 和富 H_2O 流体; 富 CO_2 流体将含 $0.77\text{mol}\%$ 的 CO_2 (图 2b, B 点), 富 H_2O 流体会含 $0.10\text{mol}\%$ CO_2 (图 2b, A 点)。捕获这两种流体的包裹体将分别均一化为气相和液相。

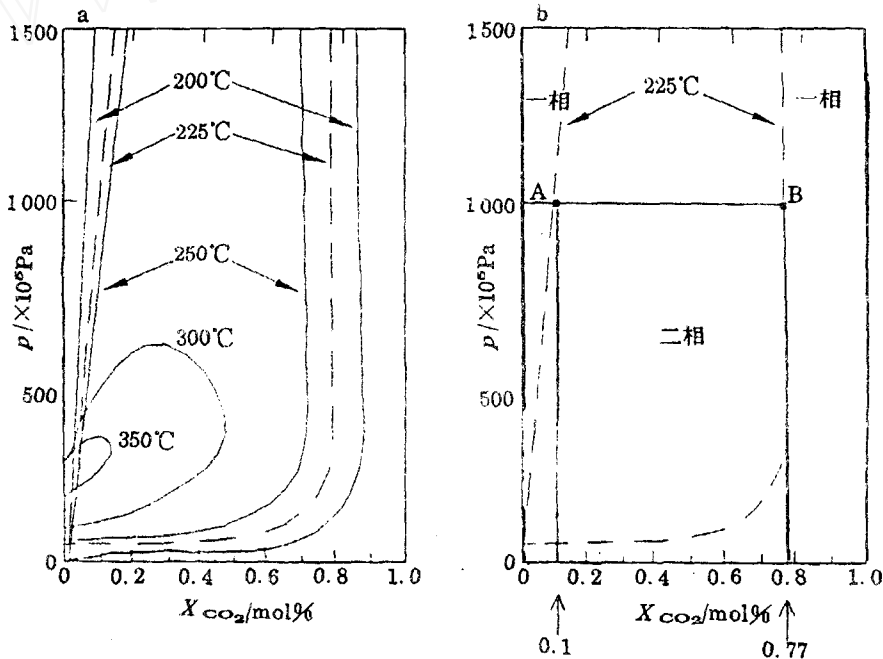


图 2 $p-X_{\text{CO}_2}$ 浓度图表示所标记的温度下流体不混溶范围

6.2 CO_2 流体的密度

Meikle 矿床, 含 CO_2 (液-气) 包裹体在 $19.5 \sim 25.4^\circ\text{C}$ 的温度范围均一化为液体, 表明 CO_2 流体密度为 $0.70 \sim 0.78\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (图 3a)。Betze/Post 矿床的二相次生富 CO_2 包裹体在 $10.6 \sim 20^\circ\text{C}$ 的温度均一化为液体, 表明流体密度为 $0.77 \sim 0.86\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (图 3b)。液-气均一化温度和计算的 CO_2 流体密度可以用修改的 Redlich-Kwong 方程来解释。

6.3 成矿的压力

对 Meikle 矿床来说, 假定 CO_2 流体密度为 $0.70 \sim 0.78\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 富 H_2O 包裹体的液-气均一化温度为 $200 \sim 225^\circ\text{C}$, 根据状态方程可以预测其成矿阶段的压力为 $(800 \sim 1\,150) \times 10^5\text{Pa}$

(表2A), 而对 Betze/Post 矿床, 假定 CO_2 流体密度为 $0.77 \sim 0.86 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 富 H_2O 包裹体的均一化温度为 $150 \sim 180^\circ\text{C}$ 和 $200 \sim 210^\circ\text{C}$, 则预测其成矿阶段的压力分别为 $(750 \sim 1\,235) \times 10^5 \text{ Pa}$ 和 $(1\,000 \sim 1\,425) \times 10^5 \text{ Pa}$ (表 2B、C)。

表 2 据修改的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系状态方程预测的压力

矿床	均一化温度 / $^\circ\text{C}$	CO_2 密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	CO_2 均一化为液态温度 / $^\circ\text{C}$	压力 / $\times 10^5 \text{ Pa}$
Meikle ↓ A	200	0.71	25.4	800
	200	0.78	19.5	1 025
	225	0.71	25.4	900
	225	0.78	19.5	1 150
Betz/Post ↓ B ↓ C ↓	150	0.78	20.0	750
	150	0.86	10.6	1 040
	180	0.78	20.0	900
	180	0.86	10.6	1 235
	200	0.78	20.0	1 000
	200	0.86	10.6	1 365
	210	0.78	20.0	1 055
	210	0.86	10.6	1 425

6.4 成矿流体的相平衡条件

图 4 示 Meikle 和 Betze/Post 矿床捕获的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体包裹体中不混溶 CO_2 相的相关系数和均一化温度。虚线表示富 H_2O 包裹体的液-气 CO_2 均一化温度的等温线; 实线是富 CO_2 包裹体的 CO_2 均一化温度的等温线。 CO_2 的临界温度是 31°C , 这条等温线对液/气两类包裹体都用 L/V 表示, 富 CO_2 和 H_2O 流体的两条临界等温线之间的区域表示为阴影区 (d 区)。

Meikle 矿床的流体包裹体, 在 $19.5 \sim 25.4^\circ\text{C}$ 时 CO_2 均一化为液态 CO_2 相, 而与其形成不混溶对的富 H_2O 包裹体在 $200 \sim 225^\circ\text{C}$ 均一化为液相, 对应于图 4 的 a 区。

Betze/Post 矿床的流体包裹体, 在 $10.6 \sim 20^\circ\text{C}$ 时 CO_2 均一化为液态 CO_2 相, 而与其形成不混溶对的富 H_2O 包裹体在 $150 \sim 180^\circ\text{C}$ 和 $200 \sim 210^\circ\text{C}$ 时均一化为液相, 标注在图 4 的 b 区和 c 区。由于均一化温度是最低的捕获温度, 所表示的压力也是最小压力。

7 成矿深度

假设 Meikle 矿床的岩石静压力条件为 $(800 \sim 1\,150) \times 10^5 \text{ Pa}$, 所代表的深度是 $3.0 \sim 4.3 \text{ km}$ 。

Betze/Post 矿床的岩石静压力为 $(750 \sim 1\,235) \times 10^5 \text{ Pa}$ 和 $(1\,000 \sim 1\,425) \times 10^5 \text{ Pa}$, 所代表的深度分别为 $2.8 \sim 4.7 \text{ km}$ 和 $3.8 \sim 5.4 \text{ km}$ 。

这些计算是假设 100% 的岩石静压力和存在不混溶的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 成矿流体。若条件部分或全部是流体静压力, 则深度会更大。

8 结论

(1) 花岗闪长岩岩株和有关岩脉的侵入形成了热液流体。深源的、低盐度的含 CO_2 和痕量

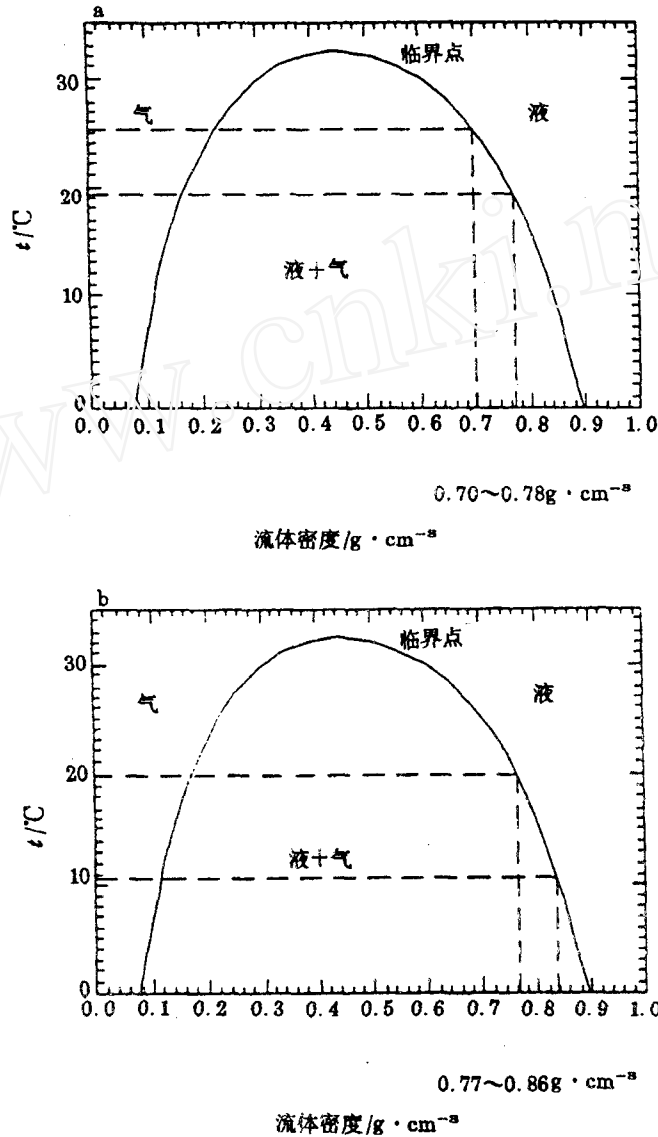


图3 0°C ~ 临界温度(31°C)的液态和气态 CO₂ 的密度

H₂S 的岩浆的或变质的流体将金搬运。

成矿阶段流体包裹体低的均一化温度(< 210°C)、中等pH值(4~6)和相近的 H₂S 浓度(10⁻¹ ~ 10⁻² mol),说明金呈二硫化物络合物搬运。

(2) 酸性的富 CO₂ 和富 H₂S 的 H₂O-CO₂ 成矿流体通过网状裂隙向上运移,使碳酸盐溶解,体积减小,孔隙度和渗透性增加,并析出铁质。

流体和岩石反应使硅酸盐矿物泥化,使主岩中析出的铁形成黄铁矿,从而使金堆积在交代矿石之中。深源流体为原地的地下水混合而开始冷却和稀释,使碳酸盐形成碧玉状硅化并在开放空间里石英-萤石-雌黄和金沉淀下来。

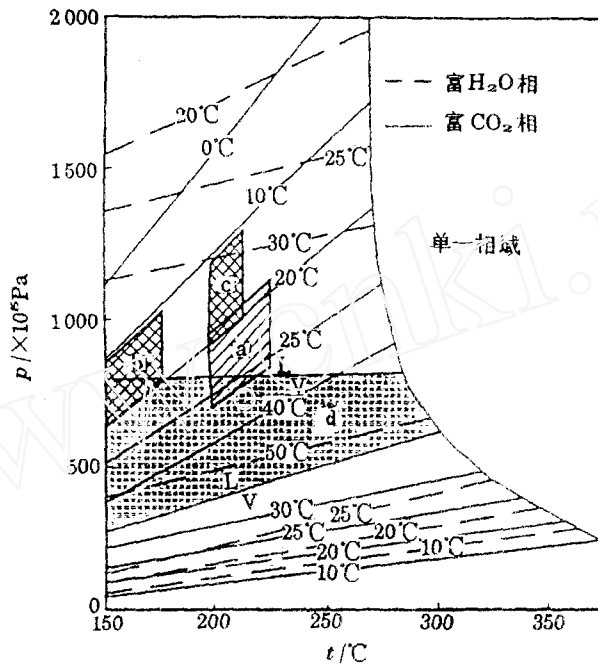


图4 表示 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体包裹体中不混溶 CO_2 相的相关系和均一化温度的压力-温度图
本图未包括溶解的 NaCl 和其他组分的影响; $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 数据取自 Takenouchi 和 Kennedy (1964)

(3) 成矿流体继续为原地的地下水冷却和稀释,使晚期成矿阶段的雄黄和方解石堆积。流体继续混合使 CO_2 浓度降低,相应地趋于低的同位素值,流体因与主岩反应或将渗入的地下水加热而中和,方解石因 pH 值增大而沉淀。

(4) 成矿后的方解石是在热液体系的很晚阶段从流过剩余的开放断裂带的低温流体中沉淀的。这时流体基本上全是水。

(5) $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系的相平衡条件表明,矿床的矿石堆积时的最小压力为 $(750 \sim 800) \times 10^6 \text{Pa}$,假定在岩石静压力条件下,矿体形成的最小深度为 2.8 ~ 3.0 km。

戴杰敏编译自对外交流资料

(四川省广汉市 201 信箱, 618300)

戎嘉树 校