

西澳大利亚纳沃日金矿流体混合 与金的成矿作用

范宏瑞¹ D. I. Groves² E. J. Mikucki² N. J. McNaughton²

(1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2 西澳大利亚大学地质与地球物理系矿床
教学研究中心, 珀斯, 澳大利亚)

提 要 流体包裹体研究表明, 纳沃日金矿成矿脉体中流体包裹体类型有三种, 富 CH_4 、 CH_4 - CO_2 - H_2O 和富 H_2O 包裹体。初始成矿流体是富 CH_4 热液, 在主矿化阶段, 另一来源的 CO_2 - H_2O 流体与 CH_4 流体发生了不均匀混合, 并且在石英-磁黄铁矿阶段最为强烈, 造成不同矿化部位的 x_{CH_4} 变化极大, 早期近于纯 CH_4 流体被充分“稀释”后, 石英-磁黄铁矿阶段的 x_{CH_4} 显著减小, 到成矿晚期只剩 CO_2 - H_2O 流体。正是由于不同性质流体的混合, 造成热液的 pH 及 f_{O_2} 的升高, 流体中的金-硫络合物分解, 金沉淀成矿。

关键词 流体混合 成矿热液 成矿作用 纳沃日 西澳大利亚

中图分类号: P618.51 **文献标识码**: A

西澳大利亚克拉通是世界上最重要的黄金产地之一, 澳大利亚 90% 以上的金都产于此。流体包裹体研究表明, 形成西澳大利亚太古代伊尔刚 (Yil-garn) 地块脉状金矿床的成矿热液为中温、低盐度、富 CO_2 的流体 (Groves, 1993), 一般认为该类金矿金的沉淀成矿是由单一流体在水/岩反应及热液物理化学条件显著变化联合作用下发生的 (Ho et al., 1992)。伊尔刚地块纳沃日 (Nevoria) 金矿为一赋存在条带状铁建造内的金矿床, 本文的流体包裹体研究表明, 该矿床可能是由性质截然不同的两端元组分流体经不均匀混合后形成的, 这为进一步探讨本区脉状金矿床的形成机理开辟了新的思路。

1 区域与矿区地质

纳沃日金矿位于西澳大利亚太古代伊尔刚地块南十字架 (Southern Cross) 绿岩带中部 (图 1), 北邻同造山 Ghooli 花岗岩岩穹, 其直接赋矿围岩为太古代角闪岩及条带状含铁建造。矿区的角闪岩由三个岩性段组成 (图 2): (1) 中-细粒块状角闪岩, 厚度 > 100 m, 具鬃刺结构及枕状构造; (2) 细粒角闪岩, 厚 10~20 m, 含有宽度为 2 mm~2 cm 的石英-斜长石

条带; (3) 细粒角闪岩, 厚 10~20 m, 发育有较强的叶理化作用 (Arnold et al., 1995), 各岩性段为渐次变化。

金矿体为似层状, 并主要分布在条带状铁建造层中, 金矿化类型有两种, 一是交代原生条带状铁建造的细粒硫化物矿化, 另一是平行或切穿条带状铁建造的脉状石英-硫化物化。主要硫化物磁黄铁矿以细粒浸染状分布于条带状铁建造矿化带内或呈块状聚合体 (脉) 切穿条带状铁建造层, 自然金主要在后者中出现。高品位 (>6 g/t) 金矿化主要位于富磁黄铁矿的条带状铁建造及石英-磁黄铁矿脉体内。

根据 Bouchot 等 (1996) 研究, 区域角闪岩系岩石曾受到强烈褶皱变形作用, 区域变质作用 (500~610 °C, 200~500 MPa) 发生在变形同期或峰期之后 (2.64~2.63 Ga), 而本区的金矿化则在区域构造热事件之后 (Groves, 1993)。

2 样品采集与实验方法

由于交代原生条带状铁建造的细粒硫化物矿化体中矿物颗粒较细, 很难对其进行流体包裹体观察测试, 本次流体包裹体研究的重点为平行或切穿条

第一作者简介 范宏瑞, 男, 1963 年 9 月生, 博士, 副研究员, 从事地质流体及金属矿床地球化学研究。

收稿日期 2000-12-07; 改回日期 2000-12-21。张绮玲编辑。

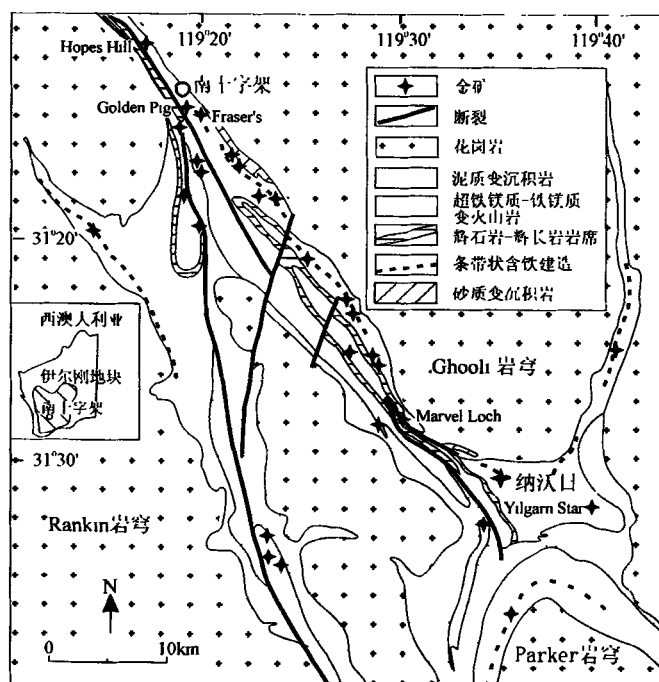


图1 西澳伊尔刚地块南十字架-纳沃日地区地质略图
(据 Gee, 1995)

Fig. 1 Geological map of Southern Cross - Nevoria district in the Southern Cross greenstone belt, showing lithologic distribution, regional structure and location of gold deposits (modified from Gee, 1995)

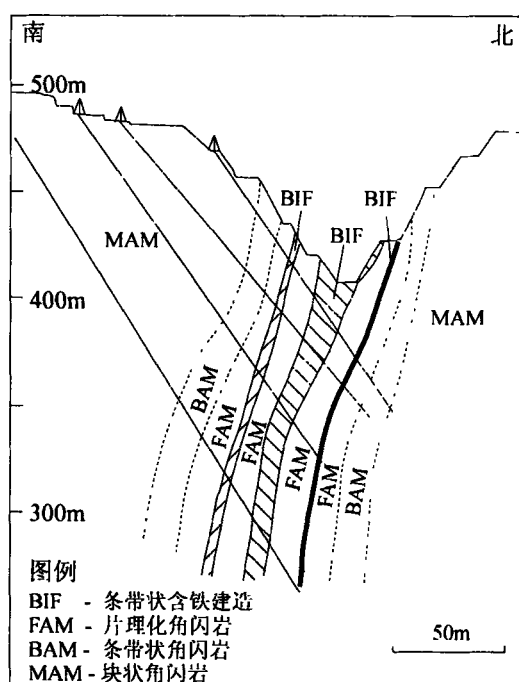


图2 纳沃日金矿 Parbo 采坑 6840E 线地质剖面图
(据 Arnold, 1995)

Fig. 2 Geological cross-section through Parbo pit at 6840E line in Nevoria, emphasizing the principal BIF zones and amphibolites (after Arnold, 1995)

带状铁建造的石英-硫化物脉体。根据矿物组合,又可将石英-硫化物脉体分为石英-磁黄铁矿±黄铜矿脉系和石英-黄铁矿脉系。

(1) 石英-磁黄铁矿±黄铜矿脉 厚度一般为1 cm~1 m,平行或切穿条带状铁建造层。脉体通常为块状,由石英、磁黄铁矿、角闪石、斜方辉石及少量的黄铜矿组成,脉体中有自然金出现。根据钻孔岩芯观察,紧靠脉体两侧的条带状铁建造中强烈富集细粒层状磁黄铁矿,而离开脉体几厘米至几十厘米后,磁黄铁矿显著减少。含块状磁黄铁矿的石英脉一般金品位较高(>20 g/t)。

(2) 石英-黄铁矿脉 该脉体也切穿富磁黄铁矿的条带状铁建造层。脉体中的石英以晶簇状、较完好晶形出现,而黄铁矿一般以线状赋生在晶簇石英周围。脉体的厚度为2 cm~20 cm。尽管在钻孔岩芯中没有直接观察到石英-磁黄铁矿脉与石英-黄铁矿脉间的交切关系,但在镜下经常可以发现黄铁矿交代磁黄铁矿的现象,脉体中很少有自然金出现。

本次研究从纳沃日金矿四个钻孔岩芯(DDH76至79)中采集了不同矿化期次脉体的代表性样品共

20块,并制成流体包裹体薄片。显微测温分析是在西澳大利亚大学地质与地球物理系 USGS 热台上进行的,并利用 FLUID INC 公司提供的人工合成流体包裹体标准样品对热台进行了温度标定,其冷冻法(-180~0℃)和加温法(20~600℃)的测试精度分别约为±0.2℃和±2℃。包裹体测试的升温速率一般为1℃/分钟,在相变化温度附近,升温速率减小到<0.4℃/分钟。由于含碳包裹体加温时极易爆裂,测试中只获得了少量完全均一温度数据。利用流体包裹体计算程序 MacFlincon (Brown et al., 1995)及 Bakker (1997)提供的笼合物计算程序对测试结果进行了数据处理,并利用 Thiéry 等(1994)的图解获得含碳包裹体的摩尔体积及摩尔分数。

3 成矿流体类型

3.1 流体包裹体类型

石英-磁黄铁矿和石英-黄铁矿矿化脉体中含有大量流体包裹体,其个体大小较均匀,分布也较均匀,常见到几种不同类型包裹体共生在一起。根据

室温及冷冻下相态变化所确定的包裹体成分,可将流体包裹体划分成富 CH_4 、 $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 和富 H_2O 包裹体 3 种类型。

(1) 富 CH_4 包裹体一般为 $5\sim 20\ \mu\text{m}$,孤立状或线状分布,拉长负晶形,为原生或假次生包裹体。室温下该包裹体一般由超临界液态泡和水相组成,充填度 $0.4\sim 0.9$ 。

(2) $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体的大小和形态与富 CH_4 包裹体非常相似,如果不利用冷冻法测温是无法将它们区分开来的,特别是在石英-磁黄铁矿脉体中。 $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体呈线状分布但不切穿石英

颗粒边界,明显为假次生包裹体。室温下这类包裹体由 $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 超临界液泡和水溶液组成,充填度为 $0.6\sim 0.9$,但富水相的包裹体充填度一般在 $0.2\sim 0.4$ 。

(3) 富 H_2O 包裹体一般为负晶形或不规则形,由气和液两相组成,充填度 0.1 至 0.2 。大小为 $3\sim 15\ \mu\text{m}$,沿愈合裂隙线状分布,为次生包裹体。

3.2 显微测温结果

各成矿脉体中流体包裹体显微测温结果列在表 1 中。现将各脉体中包裹体冷冻和加温过程中的相态变化及物性特征分述如下。

表 1 纳沃日金矿流体包裹体显微测温结果

Table 1 Summary of microthermometric data on fluid inclusions in Nevoria gold deposit

脉体	包裹体类型	期次	$t_{m(\text{car})}/^{\circ}\text{C}$	$t_{h(\text{car})}/^{\circ}\text{C}$	$t_{m(\text{clath})}/^{\circ}\text{C}$	$t_{m(\text{ice})}/^{\circ}\text{C}$	$t_{h(\text{tot})}/^{\circ}\text{C}$
石英-磁黄铁矿 ±黄铜矿脉	富 CH_4	P/PS	$-182.8\sim -180.1$	$-99.8\sim -73.7$	$12.1\sim 19.5$		$262.2\sim 343.4$
	$\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$	PS	$-74.5\sim -56.8$	$-52.3\sim 3.6$	$7.5\sim 17.1$		$241.2\sim 383.8$
	富 H_2O	S				$-3.8\sim 0.0$	$82.5\sim 291.3$
石英-黄铁矿脉	$\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$	PS	$-61.5\sim -57.3$	$-5.5\sim 13.8$	$9.2\sim 12.1$		$205.7\sim 289.4$
	富 H_2O	PS/S				$-2.8\sim 0.0$	$85.6\sim 228.5$

注: P—原生包裹体; PS—假次生包裹体; S—次生包裹体; $t_{m(\text{car})}$ —含碳相的融化温度; $t_{h(\text{car})}$ —含碳相的部分均一温度; $t_{m(\text{clath})}$ —笼合物的融化温度; $t_{m(\text{ice})}$ —冰点; $t_{h(\text{tot})}$ —完全均一温度

(1) 石英-磁黄铁矿 ± 黄铜矿脉中的流体包裹体富 CH_4 包裹体 冷冻过程中,当温度低于 -100°C 时,在液态泡中形成一气泡,约在 -185°C 左右包裹体完全固结。回温时,包裹体中的固相迅速在纯 CH_4 三相点 (-182.5°C) (Van den Kerkhof et al., 1994) 附近, $-182.3^{\circ}\text{C}\sim -180.1^{\circ}\text{C}$ 时融化(图 3A)。这类包裹体的部分均一温度(至液相)为 $-99.8^{\circ}\text{C}\sim -73.7^{\circ}\text{C}$ (图 3A)。这些特征与纯 CH_4 流体的性质(Ramboz et al., 1985)基本一致。继续回温后,笼合物的融化温度为 $12.1^{\circ}\text{C}\sim 19.5^{\circ}\text{C}$ (图 3A)。充填度较高的包裹体一般在 $221^{\circ}\text{C}\sim 365^{\circ}\text{C}$ 就发生爆裂,从充填度较低的包裹体中获得的完全均一温度为 $262.2^{\circ}\text{C}\sim 343.4^{\circ}\text{C}$ (图 3C)。

$\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体 室温下这类包裹体由 $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 液态泡和 H_2O 溶液相组成。包裹体完全被冷冻并回温后,固相的初始熔化温度($t_{m(\text{car})}$)低于 CO_2 的三相点 (-56.6°C) 较多,为 $-74.5^{\circ}\text{C}\sim -56.8^{\circ}\text{C}$ (图 3B),表明包裹体中除 CO_2 外还有 CH_4 等组分。进一步回温后,包裹体在较大的温度区间, $-52.3^{\circ}\text{C}\sim 3.6^{\circ}\text{C}$ (图 3B) 发生部分均一。笼合物的

融化温度($t_{m(\text{clath})}$)为 $7.5^{\circ}\text{C}\sim 17.1^{\circ}\text{C}$ (图 3B)。多数包裹体在达到完全均一之前就已爆裂,从气液比较低的这类包裹体中获得的完全均一温度(均一至液相)为 $241.2^{\circ}\text{C}\sim 383.8^{\circ}\text{C}$ (图 3C)。由于甲烷的存在, $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 的水合物(笼合物)的融化温度多高于 10°C 。假设包裹体中含碳相主要为 CO_2 和 CH_4 , 根据上述测温数据经计算获得的含碳相 CO_2 和 CH_4 的摩尔分数 x_{CO_2} 和 x_{CH_4} 分别为 $0.99\sim 0.28$ 和 $0.72\sim 0.01$,而在总包裹体中 CO_2 和 CH_4 的摩尔分数(x_{CO_2} 和 x_{CH_4})则分别为 $0.66\sim 0.05$ 和 $0.32\sim <0.01$ 。计算得到的含碳相密度 ρ_{Car} 和包裹体总密度 ρ 分别为 $1.07\sim 0.47\ \text{g}/\text{cm}^3$ 和 $1.06\sim 0.62\ \text{g}/\text{cm}^3$,水溶液相的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}}) = 9.83\%\sim 1.05\%$ 。尽管这类包裹体的含碳相的融化温度($t_{m(\text{car})}$)和笼合物融化温度($t_{m(\text{clath})}$)的温度区间较大,但从形态或充填度不同的 $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体中计算获得的 x_{CH_4} 却变化较小,而在不同样品中获得的 x_{CH_4} 则变化较大。

富 H_2O 包裹体 这类水溶液包裹体都为次生,包裹体的冰点为 $-3.8^{\circ}\text{C}\sim 0.0^{\circ}\text{C}$ (图 3D),均一温度

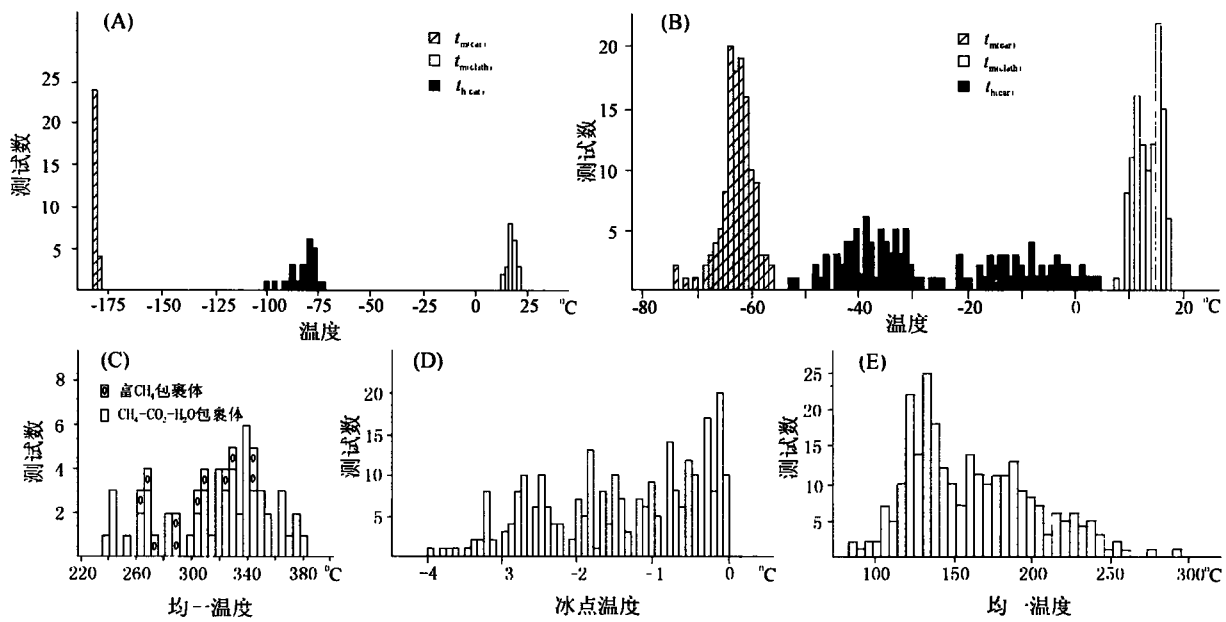


图3 石英-磁黄铁矿±黄铜矿脉体中流体包裹体显微测温结果

A—富 CH_4 包裹体的融化温度和均一温度；B— $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体的融化温度和均一温度；C—富 CH_4 和 $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体的完全均一温度；D—富 H_2O 包裹体的冰点；E—富 H_2O 包裹体的均一温度

Fig. 3 Histograms showing microthermometric measurements of fluid inclusions in the quartz-pyrrhotite ± chalcopyrite vein

(至液相)为 $82.5^\circ\text{C} \sim 291.3^\circ\text{C}$ (图 3E), 对应的水溶液包裹体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}}) = 6.15\% \sim 0.0\%$ 。

(2) 石英-黄铁矿脉中的流体包裹体

$\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体 室温下这类包裹体也由 $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 超临界液相和水溶液相组成。包裹体完全被冷冻后回温, 发生的第一个相变化为固态 CO_2 的融化 ($t_{\text{m(car)}}$), 其温度区间为 $-61.5^\circ\text{C} \sim -57.3^\circ\text{C}$ (图 4A), 比纯 CO_2 的三相点 (-56.6°C) 略低, 表明有少量的 CH_4 存在; 下一个相变化为 $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 液相和 $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 气相均一至液相 (部分均一温度 $t_{\text{h(car)}}$), 温度为 $-5.5^\circ\text{C} \sim 13.8^\circ\text{C}$ (图 4A); 笼合物的融化温度为 $9.2^\circ\text{C} \sim 12.1^\circ\text{C}$ (图 4A); 包裹体的完全均一温度 (至液相) 为 $205.7^\circ\text{C} \sim 289.4^\circ\text{C}$ (图 4B)。需要指出的是, 完全均一温度主要是从充填度 < 0.4 的包裹体中获得的, 而大于该充填度的包裹体基本都在 $215^\circ\text{C} \sim 250^\circ\text{C}$ 范围内发生了爆裂。根据上述测温结果获得的含碳相中 CH_4 摩尔分数 (x_{CH_4}) 为 $0.23 \sim 0.01$, 很明显石英-黄铁矿阶段流体中 CH_4 的含量要低于石英-磁黄铁矿 ± 黄铜矿阶段。利用 MacFlinco (Brown et al., 1995) 和 Bakker (1997) 程序计算获得的在总包裹体中的 x_{CO_2} 和 x_{CH_4} 分别为 0.50 (多为 0.19) ~ 0.09 和 $0.11 \sim < 0.01$, 含碳相密

度和包裹体总密度 ρ_{car} 则分别为 $0.97 \sim 0.48 \text{ g/cm}^3$ 和 $1.03 \sim 0.78 \text{ g/cm}^3$, 水溶液相的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $5.16\% \sim 0.11\%$ 。富 H_2O 包裹体。这类包裹体的冰点为 $-2.8^\circ\text{C} \sim 0.0^\circ\text{C}$ (图 4C), 对应盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $4.65\% \sim 0.0\%$, 完全均一温度为 $85.6^\circ\text{C} \sim 228.5^\circ\text{C}$ (图 4D)。

3.3 成矿流体演化

利用 MacFlinco 程序 (Brown et al., 1995) 及显微测温结果 (表 1) 计算获得的石英-磁黄铁矿脉体内原生和假次生富 CH_4 包裹体中含碳相的摩尔体积 (V_{car}) 为 $40 \sim 70 \text{ cm}^3$, 结合冷冻和加温过程中其相态的变化, 可以认为, 成矿流体的初始成分应以甲烷为主。镜下观察表明, 石英-磁黄铁矿脉体中假次生的 $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体要比富 CH_4 包裹体多得多, 根据显微测温结果, $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体中成分变化较大, $x_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $0.93 \sim 0.22$, 含碳相 (CH_4 和 CO_2) 在包裹体中所占的体积分数 φ_{car} 为 $0.6 \sim 0.9$, 而其中的 x_{CH_4} 变化范围极大 ($< 0.1 \sim 0.7$, 图 5); 石英-黄铁矿脉体中 $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体的摩尔体积 (V_{car}) 变化较小 ($50 \sim 70 \text{ cm}^3$), 而 CH_4 摩尔分数 (x_{CH_4}) 变化只在 $< 0.1 \sim 0.2$ (图 5), 并且随着摩尔体积的加大, x_{CH_4} 明显降低。由此可以推测, 从石英-磁黄铁矿阶

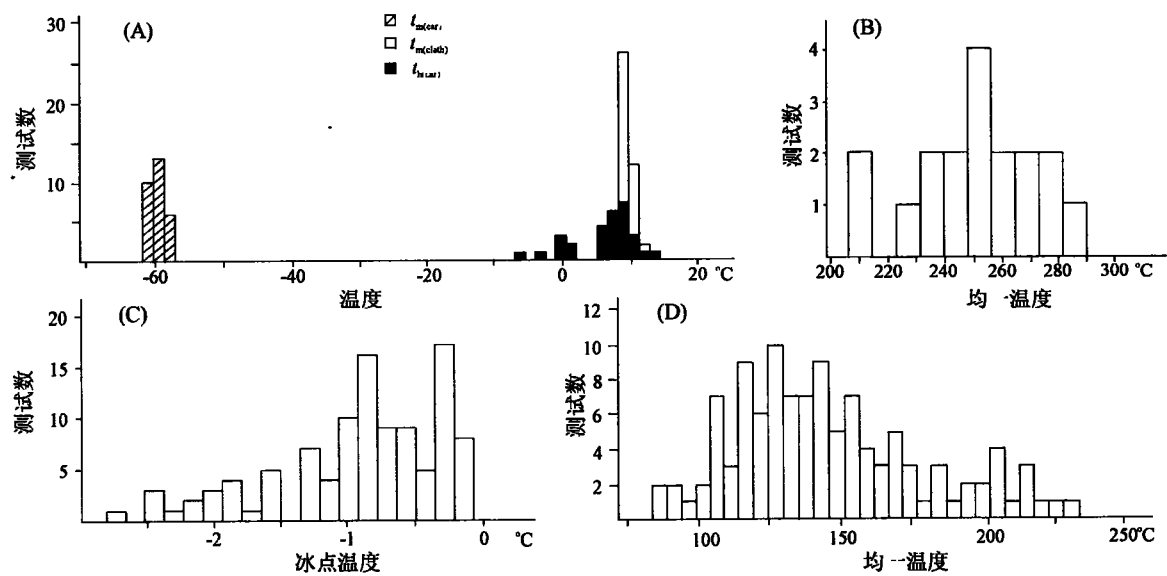


图 4 石英-黄铁矿脉中流体包裹体显微测温结果
A—CH₄-CO₂-H₂O 包裹体的融化温度和均一温度；B—CH₄-CO₂-H₂O 包裹体的完全均一温度；C—富 H₂O 包裹体的冰点；
D—富 H₂O 包裹体的均一温度

Fig. 4 Histograms showing microthermometric measurements of fluid inclusions in quartz-pyrite vein

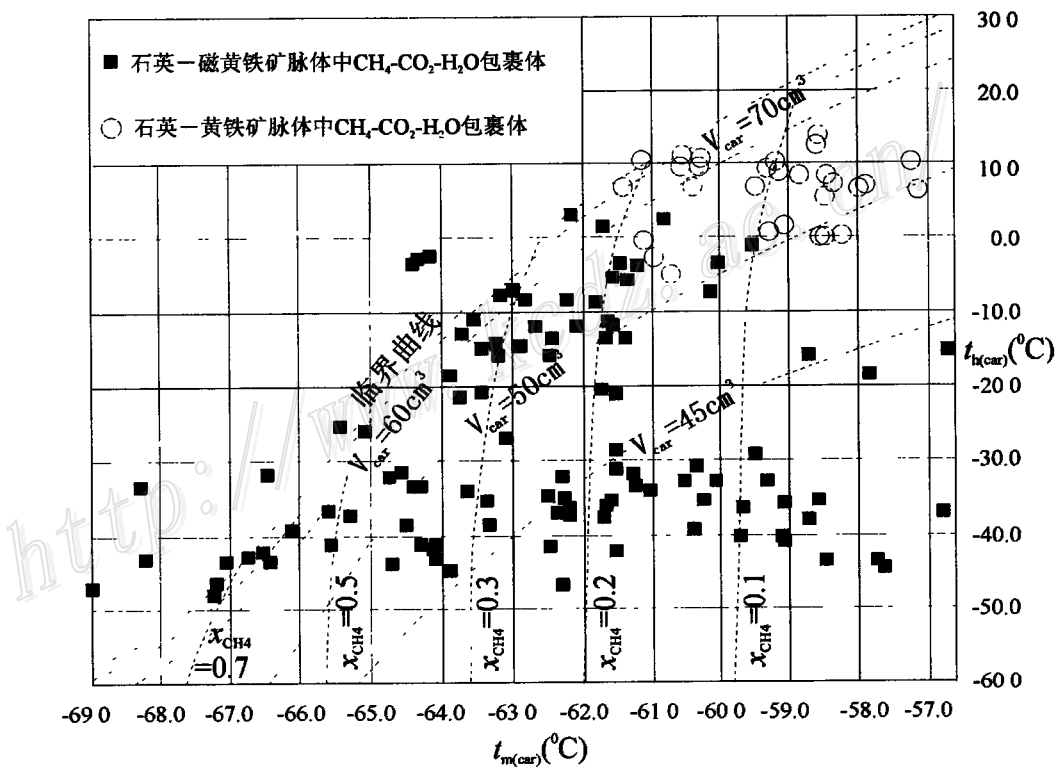


图 5 成矿脉体中 CH₄-CO₂-H₂O 包裹体的 $t_{m(car)}$ 与 $t_{h(car)}$ 关系图 (底图据 Thiéry et al., 1994)

Fig. 5 $t_{m(car)}$ versus $t_{h(car)}$ of CH₄-CO₂-H₂O inclusions in mineralizing quartz veins

段到石英-黄铁矿阶段,CH₄-CO₂-H₂O 包裹体的均一温度降低,CH₄(x_{CH_4})含量减小,包裹体中含碳质相成分从以 CH₄ 为主转为以 CO₂ 为主。

4 流体混合成矿机理

流体包裹体研究表明,纳沃日金矿成矿脉体中包裹体类型有三种,富 CH_4 、 CH_4 - CO_2 - H_2O 和富 H_2O 包裹体。由于低盐度富 H_2O 的包裹体明显切穿石英颗粒边界,它对应的是成脉期后的流体,与金矿化无关。因此,与纳沃日金矿成矿有关的成矿流体应为含 CH_4 - CO_2 热液,这和前人在本区金矿的研究成果是一致的(Ho et al., 1992; Ridley et al., 1999)。

在成矿早阶段的石英-磁黄铁矿±黄铜矿脉体中,原生流体包裹体含碳相成分只有甲烷,其他研究者(Mernagh et al., 1994; Ridley et al., 1999)在伊尔刚地块金矿中也曾发现有富 CH_4 包裹体。富 CH_4 流体可以来源于富有机质的沉积物低级或高级变质作用(Mullis, 1987; Hollister et al., 1976),在纳沃日金矿矿区外围几百米处就有含碳质的变质岩(Cullen et al., 1990),因此为推测初始的富 CH_4 流体可能来源于围岩提供了依据。

在强烈金矿化的石英-磁黄铁矿±黄铜矿脉体中, CH_4 - CO_2 - H_2O 包裹体的 CH_4/CO_2 或 x_{CH_4} 变化极大。虽然利用不均匀捕获理论可以解释该现象,但却难以说明为什么在成矿早阶段脉体中却只存在很纯的富 CH_4 包裹体,并且同一块薄片特别是同一个“包裹体串”中的 CH_4 - CO_2 - H_2O 包裹体的 x_{CH_4} 变化又相对较小。流体包裹体研究表明,在成矿晚阶段的石英-黄铁矿脉体中,部分 CH_4 - CO_2 - H_2O 包裹体的 x_{CH_4} 近于零,即为 CO_2 - H_2O 的包裹体,这暗示着在本矿区中两种不同性质流体的混合可能占据主导作用。纳沃日金矿的初始成矿流体是富 CH_4 热液,另一来源的 CO_2 - H_2O 流体与 CH_4 流体发生了不均匀混合,并且在石英-磁黄铁矿阶段最为强烈,造成不同矿化部位的 x_{CH_4} 变化极大, CH_4 流体被充分“稀释”后,石英-黄铁矿阶段的 x_{CH_4} 显著减小(图 5),到成矿晚期只剩 CO_2 - H_2O 流体。根据本矿区九件石英氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)分析结果(9.2‰~10.7‰)及前人工作(Groves et al., 2000), CO_2 - H_2O 流体应来自于区域变质作用(26 亿年)之后的造山作用,并有大气水的混染。

纳沃日金矿富金矿化赋存在条带状含铁建造中的富磁黄铁矿带和含磁黄铁矿的石英脉中,相对还原的含碳成矿流体及条带状铁建造中磁铁矿被磁黄

铁矿交代,这都表明流体中的金可能以硫络合物($\text{Au}(\text{HS})_2^-$)的形式迁移。不同性质的 CH_4 和 CO_2 - H_2O 流体发生不均匀混合后,造成热液的 pH 及 f_{O_2} 的升高,加上矿物-水反应导致的硫的还原及硫化物沉淀,流体中的金-硫络合物分解,金沉淀成矿。

5 结论

综合上述,可以得出以下几点基本认识:

(1) 成矿脉体中流体包裹体类型有三种,富 CH_4 、 CH_4 - CO_2 - H_2O 和富 H_2O 包裹体。

(2) 初始成矿流体是富含 CH_4 热液。在成矿阶段,另一来源的 CO_2 - H_2O 流体与 CH_4 流体发生不均匀混合,造成不同矿化部位(脉体)中 CH_4 - CO_2 - H_2O 包裹体的 x_{CH_4} 变化极大。

(3) 正是由于流体的不均匀混合,导致热液的 pH 及 f_{O_2} 的升高,流体中的金-硫络合物分解,金沉淀成矿。

致谢 野外和成文工作中得到纳沃日金矿,西澳大利亚大学地质系 J. Ridley、V. Bouchot,王良根、邱玉明和 F. Vanderhor 博士,中国科学院地质与地球物理研究所金成伟和谢奕汉研究员的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- Arnold R, Gordon C and Lloyd C. 1995. Geology and mining of Neveoria gold mine[A]. In: Schwebel PJ, ed.. Southern Cross Greenstone Belt, Geology and Gold Mines: Southern Cross, Western Australia [C]. Geoconference Extended Abstract. 97~101.
- Bakker R J. 1997. Clathrates Computer programs to calculate fluid inclusion V-X properties using clathrate melting temperatures [J]. Computers & Geosciences, 23: 1~18.
- Bouchot V, Fan H R, Vanderhor F, et al. 1996. Temporal relationships between barren calc-silicate and auriferous quartz-sulphide veins at the Neveoria gold deposit, Yilgarn Block, Australia: Evidence for both pre- and post-peak metamorphic hydrothermal events[A]. Abstract of 30th International Geological Congress[C], Beijing, 2. 760p
- Brown P E, Hagemann S G. 1995. MacFlincon and its application to fluids in Archean lode-gold deposits[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59: 3943~3952
- Cullen I, Jones M and Baxter J L. 1990. Neveoria gold deposits[A]. In: Hughes FE, ed.. Geology of the Mineral deposits of Australia and Papua New Guinea[C]. The Australian Institute of Mining and Met-

- allurgy, Melbourne, 301~305
- Gee R D. 1995. Regional geology of the Southern Cross greenstone belt [A]. in Schwebel P J, ed. Southern Cross Greenstone Belt, Geology and Gold Mines[C]. Southern Cross, Western Australia Geoconferrence Extended Abstract. 11~16.
- Groves D I. 1993. The Crustal continuum model for late-Archaeon lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia[J]. Mineralium Deposita, 28: 366~374.
- Groves D I, Goldfarb R J, Knox-Robinson C M, et al. 2000. Late-kinematic timing of orogenic gold deposits and significance for computer-based exploration techniques with emphasis on the Yilgarn Block, Western Australia[J]. Ore Geology Reviews, 17: 1~38.
- Ho S E, Groves D I, McNaughton N J, et al. 1992. The source of ore fluid and solutes in Archaeon lode-gold deposits of Western Australia [J]. Journal of Volcanic and Geothermal Research, 50: 173~196.
- Hollister L S, Burruss R C. 1976. Phase equilibria in fluid inclusions from the Khtada metamorphic complex [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 40: 163~175.
- Mernagh T P, Witt W K. 1994. Early methane-rich fluids and their role in Archean gold mineralisation at the Sand King and Missouri deposits, Eastern Goldfields Province, Western Australia[J]. AGSO Journal of Australia Geology and Geophysics 15: 297~312.
- Mullis J. 1987. Fluid inclusion studies during very low-grade metamorphism[A]. In Frey M, ed., Low Temperature Metamorphism [M] Blackie Glasgow, 162~199.
- Ramboz C, Schnapper D, Dubessy J. 1985. The P-V-T-X- f_{O_2} evolution of H_2O - CH_4 - CO_2 -bearing fluid in a wolframite vein, Reconstruction from fluid inclusion studies[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 49: 205~219.
- Ridley J, Hagemann S G. 1999. Interpretation of post-entrapment fluid-inclusion re-equilibration at the Three Hill, Marvel Loch and Griffins Find high-temperature lode-gold deposits, Yilgarn Black, Western Australia[J]. Chem. Geol., 154: 257~278.
- Thiery R, van der Kerkhof A M, Dubessy F. 1994. VX properties of CH_4 - CO_2 and CO_2 - N_2 fluid inclusions: modeling for $T < 31^\circ C$ and $P < 400$ bar[J]. European Journal of Mineralogy, 6: 753~771.
- Van den Kerkhof AM and Thiery R. 1994. Phase transitions and density calculation in the CH_4 - CO_2 - N_2 system[A]. In De Vivo B, Frezzotti ML, eds., Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Application: Short Course Handbook of the IMA Working Group[M]. Pontignano-Siena, 171~190.

Fluid Mixing in the Generation of Nevorio Gold Mineralisation in the Southern Cross Greenstone Belt, Western Australia

Fan Hongrui

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

D. I. Groves, E. J. Mikucki and N. J. McNaughton

(Key Centre for Teaching and Research in Strategic Mineral Deposits, Department of Geology and Geophysics, The University of Western Australia, Nedlands 6907, Perth, Australia)

Key Words: Fluid mixing, ore forming-fluid, gold mineralization, Nevorio, western Australia

Abstract

The Nevorio deposit, a banded iron formation-hosted gold deposit, occurs within the roof of amphibolite-facies greenstones in the Southern Cross belt, Yilgarn Block, Western Australia. The mineralizing veins include early quartz-pyrrhotite $\pm$ chalcopyrite veins and late quartz-pyrite veins. Three types of fluid inclusions, namely CH_4 -rich, CH_4 - CO_2 - H_2O and H_2O -rich ones, were found at Nevorio. Microthermometric data reveal that the initial auriferous fluids were CH_4 -dominant. Fluid mixing may have caused remarkable variations of CH_4/CO_2 ratios or x_{CH_4} of CH_4 - CO_2 - H_2O inclusions, particularly in mineralized quartz-pyrrhotite veins. The CH_4 - CO_2 - H_2O inclusions in quartz-pyrite vein set have an apparent trend of decreasing x_{CH_4} and increasing molar volume. It can be inferred that, from the quartz-pyrrhotite stage to the quartz-pyrite stage, homogenization temperatures of CH_4 - CO_2 - H_2O inclusions decreased, and CH_4 contents (x_{CH_4}) also decreased. The carbonic phase in the inclusions varies from CH_4 -dominant to CO_2 -dominant. Phase mixing, resulting in an increase in pH and f_{O_2} , together with loss of reduced sulfur by mineral/fluid reactions and precipitation of sulfides, led to the breakdown of the gold-transporting complexes.