

广东高凤金矿形成时代的Rb-Sr、 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄测定*

李献华 桂训唐 程景平

阴国渠

(中国科学院地球化学所分部, 广州)

(核工业地勘局 291 大队, 广东乳源)

摘 要: 用含金石英脉流体包裹体 Rb-Sr 和 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 方法测定了广东高凤金矿的形成时代为印支期 (215×10^6 a)。两种方法的结果在误差范围内完全一致, 两种测定方法相互验证, 结果准确可靠。研究表明含金石英脉流体包裹体 Rb-Sr 和 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代方法对于解决石英脉型金矿的成矿时代具有很好的应用前景。

主题词: Rb-Sr 法 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法 流体包裹体 金矿

金矿床的形成时代是研究金矿成因和成矿地质构造环境的重要基础资料, 也是进一步探矿、评价成矿远景和寻找新的成矿靶区的重要依据。然而, 如何准确测定各种类型金矿床的形成年龄仍然是地质年代学家尚未彻底解决的问题, 其中很重要的原因是难以找到与成矿同时而又适合于年龄测定的岩石或矿物。在已发表的研究论文中, 用硫化物铅模式年龄估计成矿年龄比较常见, 但不同地区壳幔体系铅同位素组成特征和演化历史很复杂, 因此铅模式年龄的意义有很大的不确定性; 用绢云母、白云母等蚀变矿物进行 K-Ar、 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ ^[1] 和 Rb-Sr 年龄测定来确定金矿形成时代的关键问题在于能否确定这些蚀变矿物是否与金矿同时形成, 并且没有受到后期地质作用的影响, 因为这些蚀变矿物很不稳定, K-Ar 和 Rb-Sr 同位素体系很难保持封闭。近十多年来发展起来的流体包裹体同位素分析技术为研究金属矿床的形成时代开辟了新途径, 如 T J Shepherd et al. (1981)^[10] 用石英包裹体 Rb-Sr 法测定了 Cumbria Carrock Fell 钨矿床的形成年龄; 邱华宁和戴樟谟 (1989) 用石英包裹体 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法测定了滇西泸水钨锡矿床的形成年龄^[3]; J C Brannon et al. (1991) 详细报道了从石英和硫化物的包裹体中提取流体相做同位素分析的实验技术和各种提取物及残留物 Sr 同位素组成的对比研究^[6]。本研究借鉴已建立的石英包裹体同位素分析技术, 对广东高凤金矿进行了 Rb-Sr 和 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄测定。

1 金矿地质背景和石英流体包裹体特征

广东怀集县连麦镇高凤金矿位于连阳-新兴南北向构造、佛岗-丰良东西向构造带和华

* 广东省自然科学基金资助项目

李献华, 男, 1961 年 7 月生。1988 年 12 月获博士学位; 现任副研究员, 一直从事同位素地质年代学和地球化学研究。邮政编码: 510640

1992-04-30 收到稿件, 1992-06-25 修改回

夏-新华夏构造带三者的复合部位。区内仅有寒武系、泥盆系、侏罗系和白垩系出露。区域广泛发育了从加里东期到燕山期的花岗岩。金矿化主要受南北向破碎带控制,以单脉或网脉状含金石英脉形式产出,局部在蚀变岩中也有发育,赋矿地层为中寒武统八村群。金矿脉主要由含黄铁矿和毒砂的粗、中、细晶石英脉组成,矿脉中石英大致可分为三期,其他金属矿物还有闪锌矿、黄铜矿、方铅矿、磁黄铁矿及少量斜方砷铁矿等。

石英中的包裹体主要为原生气液包裹体,少数为液相包裹体,普遍含有机包裹体。包裹体直径约 $5\sim 10\mu\text{m}$,气液包裹体的气/液比一般为 $10\%\sim 20\%$ 。包裹体的均一温度一般小于 200°C ,主要集中在 $120\sim 185^\circ\text{C}$ 。包裹体成分测定表明,包裹体气相成分以 H_2O 为主,其次为 CO_2 、 CO 、 CH_4 ;液相成分阴离子主要为 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} ,阳离子主要为 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 。

2 样品处理和实验方法

本文分析的样品采自IV号和I号矿化带的第1和第3阶段含金石英脉。石英破碎至40~80目,选纯后交替用加热的 6N HCl 和 3N HNO_3 超声波清洗三次,每次20分钟,以除去少量硫化物、碳酸盐等沾染物,最后用去离子水超声波清洗三次。

准确称取 $0.5\sim 1\text{g}$ 处理过的石英样品,加入 ^{87}Rb 和 ^{84}Sr 稀释剂,在加盖的 10ml Teflon溶样器中用超纯 $\text{HF}+\text{HNO}_3$ 加热 $5\sim 7$ 天分解样品。用常规的阳离子交换方法分离Rb和Sr。Rb和Sr同位素组成在中国科学院地球化学研究所同位素地球化学实验室的VG-354多接收质谱仪上测定。以 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 为标准化值, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值的测量误差在 4% 以内。Rb、Sr同位素分析结果列于表1。

表1 广东高凤金矿石英Rb、Sr同位素分析结果
Table 1. Rb-Sr isotope analyses of quartz from the Gaofeng gold deposit

样品号	样 品	Rb/ 10^{-6}	Sr/ 10^{-6}	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
G-119-1	IV号矿带第1阶段含金石英脉	3.52	1.831	7.3903	0.748937 ± 20
G-141	IV号矿带第3阶段含金石英脉	1.33	4.095	0.7816	0.728202 ± 33
G-144-5	I号矿带第1阶段含金石英脉	2.97	3.083	2.7826	0.734201 ± 24
G-147	I号矿带第3阶段含金石英脉	4.78	22.36	0.6168	0.723336 ± 11
G-147 ^①	I号矿带第3阶段含金石英脉	5.00	22.75	0.6351	0.723539 ± 11

① 为同一样品的两次重复测定

用纯净的石英进行Rb-Sr同位素分析的目的在于期望获得石英中原生流体包裹体的年龄。石英的化学性质稳定,在大多数地质条件下,石英中的原生包裹体不易发生泄漏,而保持封闭状态,只有特别过热和石英内发生晶格变形组构的情况除外。因此,无解理或少解理、机械强度良好的石英能够基本满足同位素地质年龄测定的要求^[10],这就提供了解决石英脉型金矿形成时代的新途径。提取石英包裹体通常用真空热爆或击碎浸取的方法,其优点是避免了在分析包裹体时少量非包裹体杂质的影响,但包裹体回收率较低,样品用量较大,因此,

这两种方法较适合于含有杂质的不纯石英中包裹体的提取。而对纯净石英中包裹体 Rb-Sr 同位素分析, 用全溶方法代替真空热爆和(或)击碎浸取方法亦可获得可靠的结果, 而且更为简便。例如, 加拿大 British Columbia Bluebell Pb-Zn 矿的研究表明, 由石英包裹体提取物数据点构成的等时线和与石英全溶数据点一并构成的等时线所获得的年龄结果完全一致^[8]。

称取 HCl、HNO₃ 和去离子水处理过的含金石英脉样品 (G-118-1) 0.90 g, 用铝箔包裹, 在西南核物理化学研究所的游泳池型反应堆照射, ZHB-2506 黑云母实验室标准样与样品同时照射。在进行 Ar 分析前, 样品再用 2 N HF 加热清洗 20 分钟。采用邱华宁和戴樟谟 (1989) 报道的石英真空击碎技术, 在中国科学院地球化学研究所广州分部同位素地球化学实验室的 MM-1200 质谱仪上进行 Ar 同位素组成测定。Ar 同位素分析结果列于表 2。

表 2 广东高凤金矿石英真空击碎 ^{40}Ar - ^{39}Ar 分析结果
Table 2. ^{40}Ar - ^{39}Ar isotope analyses of quartz from the Gaofeng gold deposit, using crushing method in high vacuum

阶段	敲击次数	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}^*/\%$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{39}\text{Ar}/\%$	年龄 (10^6 a, 1Sd)
1	30	741.60	3.05	60.15	146.44	2.57	3604.3 ± 97.3
2	40	683.34	3.19	56.75	121.75	2.71	3320.2 ± 118.5
3	50	755.26	4.82	60.87	95.36	2.96	2956.9 ± 99.1
4	70	946.52	10.29	68.77	63.24	4.13	2385.8 ± 85.8
5	90	882.92	13.33	66.52	44.06	4.71	1931.8 ± 64.5
6	140	906.30	19.16	67.38	31.88	7.09	1569.8 ± 45.3
7	200	825.96	20.68	64.21	25.65	9.81	1352.3 ± 49.3
8	300	1018.43	40.69	70.96	17.77	16.37	1033.4 ± 30.2
9	400	1145.58	61.81	74.17	13.75	17.66	846.4 ± 24.5
10	500	1094.12	70.46	72.95	11.34	16.43	723.5 ± 28.9
11	700	1113.54	70.60	73.42	11.59	15.58	736.6 ± 30.9

注: $^{40}\text{Ar}^*$ 表放成 ^{40}Ar , (样号 G-119-1, J = 0.0435206)

与常规阶段加热技术相比, 真空击碎技术前级过程提取的只是矿物中的液体和气体, 因此该方法获得的是矿物中包裹体(包括气、液包裹体)的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄。

对于含明显次生包裹体的样品, 采取适当的前处理(如低温热爆)可以降低次生包裹体对年龄测定的影响^[6]。真空击碎 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法分析中, 先轻击几次也有助于优先排除次生包裹体, 因为通常情况下次生包裹体沿晶格变形或裂隙愈合和面分布, 也相对容易再破裂泄漏排出。但目前还不能定量消除次生包裹体对定年的影响。

3 结果与讨论

3.1 Rb-Sr 同位素

四个石英样品全溶的 Rb 含量在 $1.33 \times 10^{-6} \sim 5.00 \times 10^{-6}$ 之间, 除 G-147 号样品, 其他三个样品的 Sr 含量在 $1.831 \times 10^{-6} \sim 4.095 \times 10^{-6}$ 之间, 而 G-147 号样品的 Sr 含量却高达 22×10^{-6} , 明显高于其他三个样品。I 号矿带第 3 阶段为石英-萤石化阶段, 萤石化过程使

石英加入了过量的“外来”Sr。在Rb-Sr等时线图上，G-147号样品点明显地偏离其他三个点所构成的等时线（图1）。剔除G-147号样品点，由其余三个点组成的等时线（MSWD=1.56）斜率获得Rb-Sr年龄为 $(217.5 \pm 7.7) \times 10^6$ a， $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.72578$ ，表明含金石英脉形成时代为印支期。由于受采样条件等因素限制，本次测定只有三个样品构成Rb-Sr等时线，影响了年龄的可信度，因此这个年龄值只具有参考意义，还需要其他方法的结果加以验证。

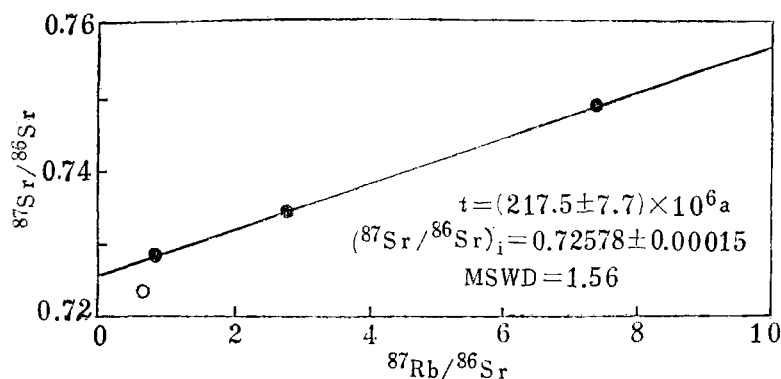


图1 高凤金矿含金石英脉的Rb-Sr等时线

Fig. 1. Rb-Sr isochron diagram of the auriferous quartz vein from the Gaofeng gold deposit.

3.2 Ar同位素

从11个击碎阶段获得的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 表面年龄变化范围为 $3604 \times 10^6 \sim 723 \times 10^6$ a，远远大于Rb-Sr年龄，并与地质事实不符。从表2可以看出，前3个阶段 ^{39}Ar 析出量很低，均

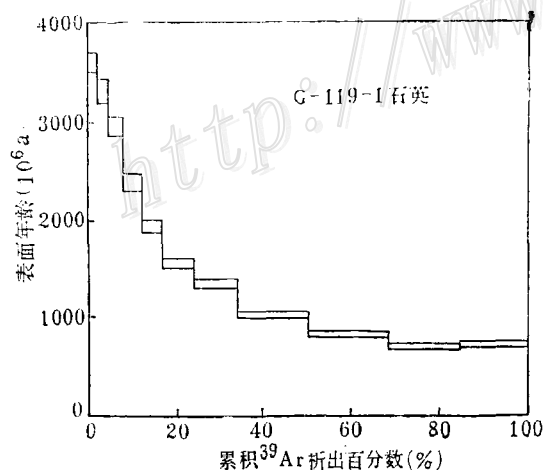


图2 高凤金矿石英的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄频谱图

Fig. 2. ^{40}Ar - ^{39}Ar age spectrum of quartz from the Gaofeng gold deposit.

不高于3%，而在实验过程中发现有明显的杂质气体存在，这表明样品可能含有极少量的次生包裹体或在结晶过程中捕获了极少量的杂质气体。在 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄频谱图上，年龄谱呈现半个“马鞍”型（图2），表明有过剩Ar存在，因此单个分析阶段的表面年龄偏老而无意义。为校正过剩Ar的影响，应采用 ^{40}Ar - ^{39}Ar 等时线方法计算年龄。由于 ^{39}Ar 含量极低，分析误差最大，我们采用的是以 ^{40}Ar 为分母的 $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ “反等时线图”^[9]，该图的x轴截距为代表由K活化生成的 ^{39}Ar 对放射成因 ^{40}Ar 之比，将此 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 比值的倒数带入 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄计算公式^[7]，就可以获得样品的年龄；而y轴截距的倒数就是样品的初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$

比值。图3为11个击碎阶段的 $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ “反等时线图”。由于前3个阶段的气体中含有明显的杂质气体，并且 ^{39}Ar 比例很低，Ar同位素组成分析很不准确，因而没有参

加数据回归。后8个阶段数据回归直线的 $\text{MSWD}=1.02$, 由截距计算得到的年龄为 $(225.1 \pm 21.0) \times 10^6 \text{ a}$, 初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=827.7 \pm 39.3$ 。第7阶段的分析数据明显偏离线性排列 (即 2σ 分析误差范围明显偏离主体相关线), 可能是由于分析的偶然误差所致。如果将其剔除统计分析, 而由7个阶段数据回归获得的直线的置信度明显增高 ($\text{MSWD}=0.412$), 由 x 轴截距计算得到的年龄为 $(214.7 \pm 21.9) \times 10^6 \text{ a}$, 初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=850.8 \pm 27.6$ 。

石英流体包裹体真空击碎 ^{40}Ar - ^{39}Ar 分析结果表明, 高凤金矿含金石英脉形成时代应为印支期, 这一结果与含金石英脉的 Rb-Sr 等时线年龄完全一致, 含金石英脉在形成过程中捕获了明显的过剩 Ar。

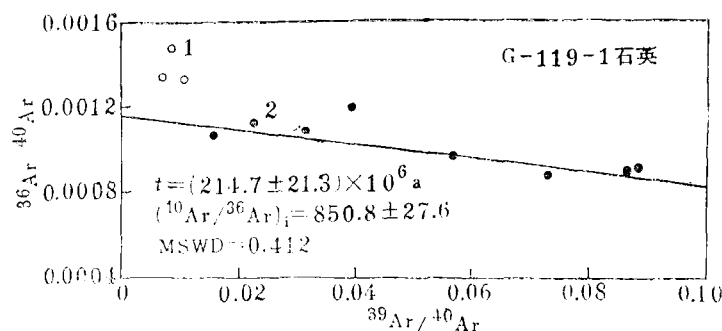


图3 高凤金矿含金石英脉的 $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ “反等时线图”

1—阶段1~3数据未参与等时线回归计算; 2—阶段4~11数据参与等时线回归计算 (最终结果剔除阶段7)

Fig. 3. $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ inverse isochron of quartz from the Gaofeng gold deposit.

1—Data of Stage 1 to 3, which did not take part in the regression; 2—Data of Stage 4 to 11, which took part in the regression. (Stage 7 was not in the regression).

近年来已有一些研究人员用各种方法探讨了广东西部金矿带一些金矿的成矿时代和成矿期次^{[1,4,5]①②③}, 初步确定成矿时代主要为燕山期, 个别为海西晚期。富云莲、叶伯丹 (1991) 系统地测定了与金共生的蚀变矿物绢云母和白云母的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄, 他们将清远—高要一带的金矿化分为四期, 早侏罗世 $184 \times 10^6 \sim 171 \times 10^6 \text{ a}$ 、晚侏罗世 $(141 \pm 6) \times 10^6 \text{ a}$ 、早白垩世 $(133 \pm 2) \times 10^6 \text{ a}$ 和晚白垩世 $(99 \pm 1) \times 10^6 \text{ a}$ 。而陈好寿和李华芹 (1991) 用石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线方法获得的河台和新州金矿的年龄为 $120 \times 10^6 \sim 130 \times 10^6 \text{ a}$ 。本文的研究结果表明, 粤西地区印支期也是一次重要的金成矿期。印支期金矿化与本地区同时代的大地构造演化及岩浆活动有密切的联系。

4 结论

(1) 广东高凤金矿含金石英脉包裹体 Rb-Sr、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄测定结果表明, 金矿的形成时代为印支期, 年龄约为 $215 \times 10^6 \text{ a}$ 。

(2) 含金石英脉包裹体 Rb-Sr 和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学方法对于解决石英型金矿的成矿

① 陈好寿等, 1989, 第四届全国同位素地质年代学、同位素地球化学学术讨论会论文

② 叶伯丹等, 1989, 第四届全国同位素地质年代、同位素地球化学学术讨论会论文

③ 张德科, 1990, 中国科学院地球化学研究所硕士学位论文

时代具有很好的应用前景,但仍然有一些方法学和技术细节问题有待于进一步的探索研究,例如,对于含有较多次生包裹体的石英,如何分别提取原生和次生包裹体,如何消除或评价次生包裹体对定年的影响;Ar在石英晶格中的分布特征,为何本文测定的含过剩Ar样品的年龄谱只有半个“马鞍”型分布等等。

(3) 由于多数金属热液矿床的石英可能含有过剩Ar,因此不易用常规的K-Ar稀释法对含矿石英测定年龄。

衷心感谢邱华宁、蒲志平、施泽恩和刘海臣对本研究的同位素分析给予的支持和帮助。

参 考 文 献

- 1 富云莲,叶伯丹.广东清远—高要金矿的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年.岩石矿物学杂志,1991,(1):21~28
- 2 骆万成,伍勤生.应用蚀变矿物测定胶东金矿的成矿年龄.科学通报,1987,(16):1245~1248
- 3 邱华宁,戴槿谟, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测定矿物流体包裹体年龄.科学通报,1989,(9):687~689
- 4 张志兰等.广东河台金矿硫铅同位素特征.广东地质,1989,(1):29~39
- 5 陈好寿,李华芹.云开隆起金矿带流体包裹体Rb-Sr等时线年龄.矿床地质,1991,(4):333~341
- 6 Brannon J C et al. Strontium isotopic constraints on the origin of ore-forming fluids of the Viburnum Trend, southeast Missouri. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, 55: 1407~1419
- 7 Faure G. *Principles of Isotope Geology* (Second edition). John Willey & Sons, Inc., 1986. 93~116
- 8 Morton R D et al. Determination of radiogenic isotope (Rb/Sr, Sm/Nd and Pb/Pb) in fluid inclusion waters: An example from the Bluebell Pb-Zn deposit, British Columbia, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1988, 52: 961~967
- 9 Roddick J C et al. The evolution of excess argon in alpine biotites—a $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1980, 48: 185~208
- 10 Shepherd T J. Fluid inclusion Rb-Sr isochrons for dating mineral deposits. *Nature*, 1981, 290: 578~579

Rb-Sr AND ^{40}Ar - ^{39}Ar DATING OF THE GAOFENG GOLD DEPOSIT, GUANGDONG PROVINCE

Li Xianhua, Gui Xuntang and Cheng Jingping

(Guangzhou Branch, Institute of Geochemistry, Academia Sinica, Guangzhou, Guangdong Province)

Yin Guoqu

(No. 291 Geological Party, South China Bureau of Geoexploration, Ministry of Nuclear Industry, Ruyuan County, Guangdong Province)

Abstract

The precise age determination of various gold deposits is a problem which has not been thoroughly solved by geochronologists, and this is greatly attributed to the difficulty in finding rocks and minerals which were formed simu-

ltaneously with mineralization and are suitable for dating. Noticeable uncertainty generally exists in the dating of gold deposits with the traditional lead isotopic model ages of sulfides and age determination of altered minerals; the isotopic analytical technique of fluid inclusions developed in the past ten years, however, has opened up a new avenue for the study of formation ages of metallic deposits.

The Gaofeng gold deposit in Lianmai Town, Huaiji County, Guangdong Province consists mainly of coarse, medium and fine quartz veins containing pyrite and arsenopyrite, and quartz in ore veins might be roughly divided into three stages. In quartz, there are mainly primary gas-liquid inclusions and a few liquid inclusions with organic inclusions commonly seen. In this study, samples of auriferous quartz veins were pretreated by HCl, HNO_3 and ion-free water, then Rb-Sr analysis and ^{39}Ar - ^{40}Ar analysis of fluid inclusions in quartz were conducted to date the gold deposit. Both methods gave a formation age of 215×10^6 a, indicating the Indosinian period. The results of the two methods are coincident with each other within the limits of the experimental error, and mutual identification has proved the results of the two methods to be both precise and reliable. It is hence shown that Indosinian is also an important gold metallogenic period in western Guangdong. Indosinian gold mineralization is closely related to geotectonic evolution and magmatic activity of the same period. We hold that, although some technological details remain to be solved, the Rb-Sr and ^{39}Ar - ^{40}Ar dating methods for fluid inclusions in auriferous quartz veins have brilliant prospects in determination of metallogenic ages of quartz vein type gold deposits.