

图8 最后推断成果图。图中示有计算机所绘出的模型的轮廓，还给出了地质解释

图8是一个小区内最后得到的解释成果图，在这里模拟结果与构造解释相结合。可以在其它计算方法的帮助下（例如，向下延拓到接近模拟结果所指出的基底标高，或者制作磁化率图），得出地质构造方面的解释。不过这将大大地决定于推断解释人员的技巧和经验。

上述现代化的定量解释方法有两种作用：第一，使物探人员从繁琐的计算工作中解放出来，以便有更多时间去研究推断解释中地质方面的问题；第二，向物探人员提供大量数值模型—拟合资料，这是进行推断解释的依据。

参 考 文 献

1. Johnson, W. W., 1963. Geophysics, Vol 31, No 1, pp. 65~71
2. Marquardt, D. W., 1963. J. Soc. Indust. Appl. Math., Vol 11, No. 2, pp. 431~441

译自1981年SEG年会上宣读的一篇论文

作者：C. V. Reeves

（王一文译，燕 樵校）

广东阳春小南山钨锡矿床石英中包裹体

地球化学找矿方法试验

冶金部地质研究所 王继华 区 杏 冯贵珍

我们在含石英脉型钨—锡矿床上进行了包裹体地球化学找矿试验研究，现将所得的试验结果介绍如下。

地 质 概 况

该矿床位于广东阳春地槽式复式向斜西南端

核部。地层为下侏罗统砂岩、板岩，矿体周围受角岩化，矿床受两组裂隙控制（北西西、北东东）地表细脉带往深部逐渐变为平行侧幕式排列的含钨石英脉组成工业矿体。矿脉主要产于燕山四期隐伏的花岗岩与砂岩、板岩接触的内外带，矿脉两侧发育不同程度的蚀变，如云英岩化、黄玉化

(含萤石)、硅化和绢云母化。主要金属矿物为黑钨矿、锡石、辉钼矿,其次为黄铜矿,黄铁矿等。脉石矿物有石英、黄玉、萤石、方解石等。

试验方法

1. 采样和样品制备

在地表、坑道和钻孔中的石英脉和围岩中采石英和花岗岩。将石英加工0.25~0.5mm粒级,经淘洗、分离,纯度在98%以上。将纯石英用稀盐酸处理半小时(稍加温),最后用清水冲洗,再电解去杂质,烘干48小时(温度低于100℃)后供分析之用。

2. 包裹体成分分析

包裹体液相成分,称20克石英样,用热解离法(热爆烈法)分解,加温到600℃,30分钟,冷却后加入去离子水,用超声波浸出包裹体中液相成分,用其清液供分析。用火焰光度计测量 K^+ 、 Na^+ ;用WTX-1型原子吸收测量 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} ;离子选择电极测量 F^- 、 Cl^- ;电位滴定法测量 SO_4^{2-} ,每个样要测浸出水溶液中的pH值。

包裹体中气相成分,利用102型气相色谱仪测量 H_2O 和 CO_2 。

分析结果和讨论

1. 石英中包裹体发育特征

经显微镜下观察,包裹体一般都很小,且分布不均匀。通过45块片子观察,把包裹体分为两类。第I类,气态包裹体(或气相的、气-液的两类),这类包裹体被捕获于气态溶液介质和水溶液介质中,二者加热均为均化气相。包裹体一般在几至十几 μm ,多为四边形、六边形等。这类包裹体多分布于花岗岩中的石英和石英脉中,而含矿石英脉从矿脉底部往上逐渐减少。第II类,液态包裹体(或多相包裹体),它被捕获于各种浓度和温度的水溶液中,加热均化为液相。包裹体一般在0.1~1 μm 。含矿石英脉中富矿部位较发育,包裹体以四边形、六边形为主,其次为长柱状、粒状、树枝状、不规则形状等。在这类包裹体中局部见到子矿物和气相、液相 CO_2 。

以上两种为原生包裹体,还有一种次生包裹

体,多呈条带状形式分布。

2. 石英包裹体中均一温度变化特征

花岗岩中的石英和石英脉包裹体均一温度,气态包裹体为390~400℃,气-液包裹体为390~400℃、250~300℃。含矿石英脉中液态包裹体为350~400℃,200~300℃,气态包裹体为400℃左右。在同一条矿脉上,从底部往上,富矿部位稍高。把包裹体均一温度作成柱状图(图1)。从图中可见,成矿作用的热液活动至少有两期。

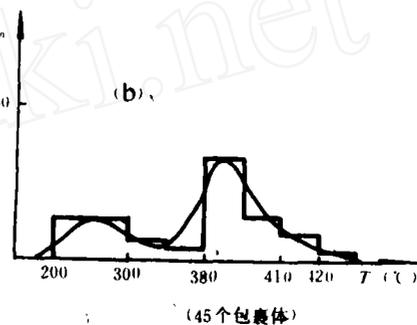
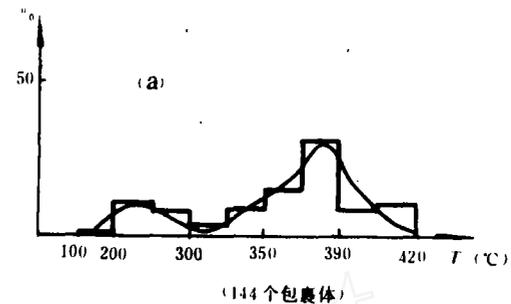


图1 均一温度柱状图

(a) 含矿石英脉中石英包裹体均一温度柱状图

(b) 花岗岩和石英脉中石英包裹体均一温度柱状图

从石英包裹体发育特征和均一温度结果来看,在同一晶体中发现有高温和低温包裹体,气态和液态包裹体共存。前者说明后期热液对早期石英有溶解作用,当硅逐渐过饱和后,在相应的物理、化学条件下,在原石英格架上又结晶。因此,出现后期捕获低温包裹体。后者说明在成矿作用过程中,成矿溶液中密度低的气相于密度高的液相中,处于两相不混溶的形式或多相形式存在,表明原始岩浆和成矿溶液是不均匀的。另外,在个别包裹体中加热时处于临界状态,从这些现象中皆可说明成矿时是处于“沸腾”状态。

3. 包裹体中成分变化特征

测包裹体成分之前,要测包裹体浸出水溶液

中的pH值。测量结果是：含矿石英脉包裹体浸出水溶液中的pH值为5~6，矿脉底部比上部酸性强。花岗岩中的石英和石英脉包裹体浸出水溶液中的pH值为4~5。从这个值的变化来看，从花岗岩至含矿石英脉包裹体中的浸出水溶液酸

性程度逐渐变强。

从石英包裹体中阳离子组分分布（图2）和阳离子含量变化可见，成矿溶液的组分应属于Ca—K—F型建造。在此基础上研究包裹体成分的变化特征。

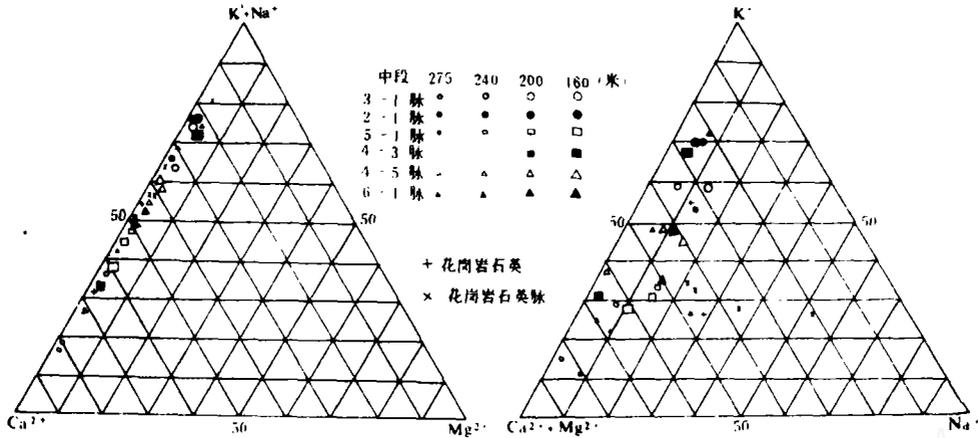


图2 各矿脉石英中包裹体阳离子组分分布图

从65个含矿石英脉包裹体成分分析，液相中阳离子成分，由 $Ca^{2+} > K^+ > Na^+ > Mg^{2+}$ 方向递减。沿矿脉走向各元素含量变化不均匀，沿垂直方向，从矿脉的底部往上呈有规律的增减（图3，上为2-1脉，下为4-5脉）。液相中的阳离子 Ca^{2+} （或 Ca^{2+}/F^- 比值），从矿脉底部往上逐渐增加，近地表下降。这与黄玉、萤石的出现有内在联系。各矿脉包裹体中的 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 离子（表1）、在同一标高上变化较大。但在垂直方向，矿脉底部多高于上部，这同矿的富集部位是一致的。液相中的阴离子 F^- 、 Cl^- ，从矿脉底部往上，在200~240米中段含量最高，近地表下降。再从 F^- 离子等量线图（图4）来看，呈条带状形式分布，含量中心点也位于200~240米中段。而富矿部位在160~200米中段。从这些现象中可见， F^- 离子与富矿的关系是密切的，同时也说明热液的流动由下往上。另外， SO_4^{2-} 酸根总的趋势，从矿脉底部往上有规律地增高，接近地表开始下降。

同一矿脉的底部低于顶部。

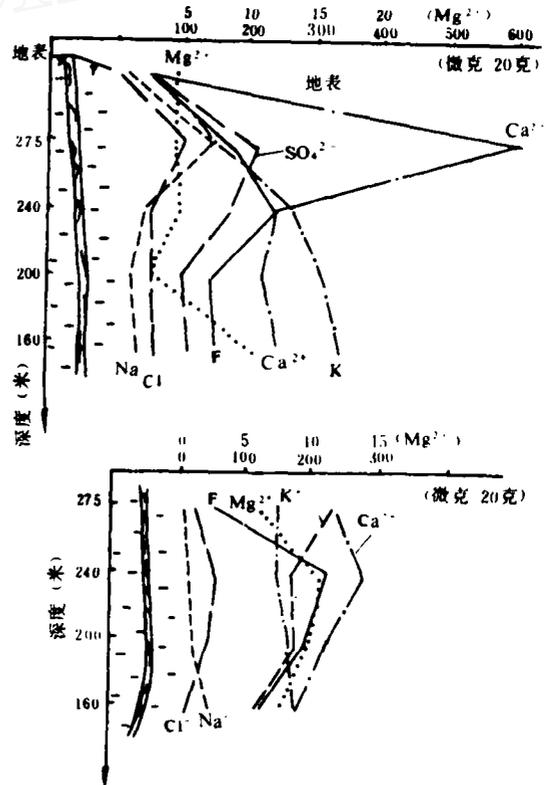


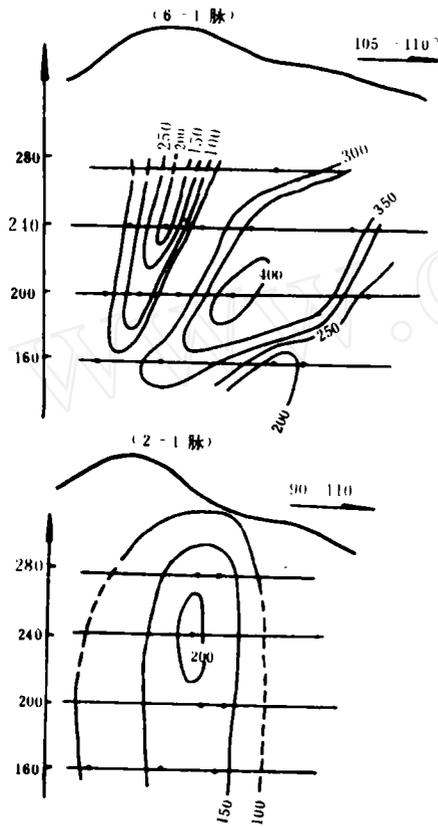
图3 小南山钨矿床含矿石英脉包裹体成分垂直变化特征

包裹体中气相成分，主要分析了 H_2O 、 CO_2 。 CO_2 从矿脉底部往上直至地表有规律地增加，并呈条带状（图5）形式分布。从这些现象中说明， CO_2 在成矿作用中，随着温度、内压的改变，促使 CO_2 的含量，在同阶段活动的早期低于晚期，

包裹体中Fe³⁺、Mn²⁺离子含量变化 表1

矿脉号	标高(米)	样号	Fe ³⁺	Mn ²⁺
6-1	240	25	17.5	3.8
	200	50	17.5	6.3
	160	71	49.0	5.6
		76	38.5	6.3
5-1	240	33	8.75	3.8
	200	59	15.0	3.8
	160	77	33.6	4.4
1-5	200	43	38.8	5.6
		16	25.0	4.4
	160	69	17.5	4.4
		70	38.5	9.4
4-3	200	42	49.0	7.5
	160	67	35.0	2.5

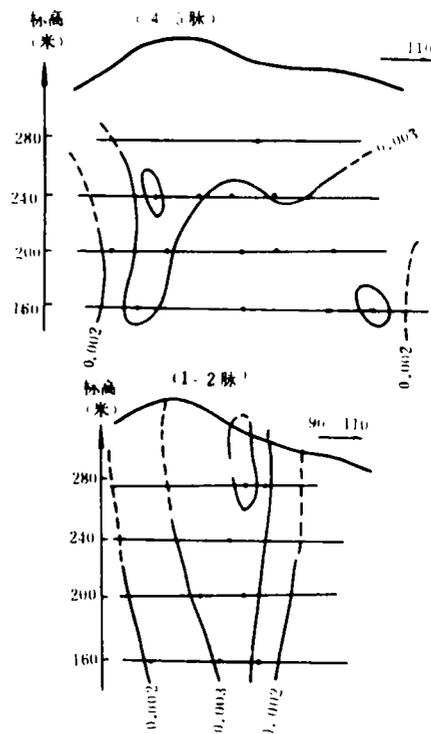
(单位: 微克/20克)

图4 小南山钨矿床含石英脉中包裹体
氟离子垂直、纵剖面图(坑道)
(等量线计量: 微克/20克)

包裹体中盐度(我们采用所有离子之和被H₂O除)变化,一般在6~10‰,最高14.13‰,最低1.53‰。高含量中心在富矿部位的上部,这说明矿在形成时与热液中的盐度是有内在联系的。

通过上述资料,说明成矿溶液的主要成分为:

氟化物(或氯化物)、H₂O、CO₂,三种物质的混合物,其次还有金属离子,如:K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、W²⁺、Mn²⁺、Fe²⁺、Li⁺等。据K. A. 波尔谢夫斯基(1979)资料,在高浓度CO₂的高压下,钨主要以钨酸络离子形式,在弱酸性溶液中同CO₂一道迁移,随着温度、压力不断改变,破坏了成矿溶液中内部的物理、化学平衡,使络合物不稳定,并引起成矿溶液中发生所谓“沸腾”作用(即气相和液相呈不混溶形式)。络合物分解,金属开始沉积成矿,挥发性组份继续上升集中。据C. H. Sondergeld等人(1979)所作的关于沸腾中矿物沉淀的试验研究,证明矿物的沉淀速度与矿液的沸腾速率成正比。沸腾愈剧烈,沉淀的矿物愈多。所以,造成矿脉内部矿化局部集中和分段富集的现象。在成矿作用中,钨酸络离子与溶液(或围岩)中的铁、锰形成黑钨矿[(Fe,Mn)(WO₄)₂]。因此,在富矿部位铁、锰相对富集由于挥发性组份上升,富矿部位上部F⁻离子增加同时F⁻与Ca²⁺结合成萤石(CaF₂),与Al³⁺、

图5 小南山钨矿床含石英脉中包裹体
CO₂垂直纵剖面图(坑道)
(等量线计量: ‰)

Si²⁺结合成黄玉 (Al₂SiO₄F₂) 出现在矿脉的两侧。另外, CO₂随着条件的改变, 从水溶液中逸出的量也愈来愈多, 所以, 晚期热液阶段, 随着CO₂和Ca的增加, 而出现大量的方解石。总之, F⁻、CO₂在成矿和运矿过程中应起到重要的指示作用, 可作为地球化学找矿的标志。

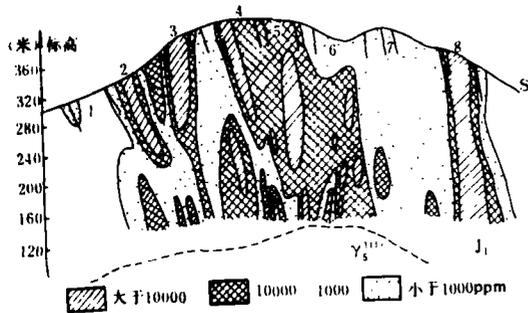


图6 小南山钨矿床氟原生晕0线横向垂直剖面图
T₁—花岗岩; J₁—板岩、砂岩; 1~8—矿体编号

从图4 Cl⁻离子剖面和原生晕剖面(图6)对比来看, 二者异常都呈条带状, 前者的异常中心比后者低, 而后者异常范围较宽, 但二者所反映的地质现象基本一致。根据这些现象, 可以肯定二者在成矿作用中的关系是非常密切的。所以, 应用包裹体成分, 可作为地球化学指示, 并为解释地球化学晕的形成机理和地球化学找矿提供主要依据。

从表2包裹体成分对比来看, 表中前三者成分基本接近, 只有CO₂, 从花岗岩、含矿石英脉直至地表石英细脉带, 其含量明显增加。另外, 从包裹体发育特征和均一温度变化来看, 前二者出现气态包裹体, 均一温度稍高。后者相反, 液态包裹体发育, 均一温度稍低。通过对比, 可说明前三者的关系是密切的, 同时也说明了成矿溶液来源于深部, 与隐伏的酸性花岗岩有密切关系。而花岗岩既是成矿溶液的母岩又是围岩。

石英中包裹体成分对比(平均值) (CO₂为%; 余为微克/20克)

表2

名称	样品数	F	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K	Na	H ₂ O	CO ₂	盐度
花岗岩中石英	4	112	30	144	86	6	82	98	6750	0.0027	8.58
花岗岩中石英脉	3	293	0	240	260	8	174	147	13800	0.0027	8.60
含矿石英脉	66	186	46	273	259	9.5	24	48	12200	0.0029	8.70
地表石英细脉带	16	41	24	114	327	10	101.6	44	13200	0.0040	3.29

结 论

1. 应用包裹体发育特征、温度、成分变化, 证实酸性花岗岩是含矿石英脉的热液来源, 成矿热液的流动方向, 从下往上。据均一温度确定成矿作用阶段, 至少有两期。

2. 在普查热液型金属矿床时, 利用包裹体成分, 在空间上的变化规律, 如 F⁻、Cl⁻离子、盐度, 在富矿部位上部高, 下部低; Ca²⁺、Ca²⁺/F

和SO₄²⁻酸根, 从矿脉底部往上逐渐增高, 近地表下降; Fe³⁺、Mn²⁺离子富矿部位高; 而CO₂从矿脉底部直至地表明显增加等特征, 可作为地球化学指示剂和地球化学普查找矿的标志。

3. 通过包裹体成分与原生晕异常的对比, 应用包裹体成分资料为解释地球化学晕的形成机理提供重要依据。

4. 在寻找热液型金属盲矿床中, 包裹体地球化学测量, 看来是一种有效的新方法。

