

广东莲花山钨矿成岩成矿温度研究^{*}

李兆麟

(中山大学地质系, 广州)

杨忠芳

(中国地质大学, 北京)

提 要: 利用淬火油浸法测得莲花山钨矿流纹岩、石英斑岩和花岗岩锆石和造岩矿物石英中熔融包裹体均一化温度。证明本区成矿溶液来源主要与石英斑岩的含矿粒间溶液有关。

关键词: 包裹体 成岩温度 粒间溶液 莲花山钨矿

1 地质概况

广东莲花山钨矿产于我国东南沿海火山岩发育区, 区域构造属华南地槽, 北侧邻近浙闽粤沿海海西-印支-燕山断陷活动带, 处于北东南澳断裂和北西向大埔-饶平断裂带的交汇部位。

矿区出露的沉积岩层为下侏罗统小坪煤系的上层部位, 主要由变质砂岩——石英砂岩和绢云母砂岩互层组成, 地层呈 NE-SW 向展布。上层绢云母砂岩夹石英砂岩为赋存矿体的岩石, 石英斑岩与上述岩层呈侵入关系, 岩体除发育有绢云母化外, 尚有不同程度的硅化、黄铁矿化、绿泥石化及云英岩化。

矿区火成作用相当复杂, 有火山岩的喷发、次火山岩的侵入以及多阶段的岩墙侵入作用。矿区主要以石英斑岩、石英闪长玢岩为主, 西北部有黑云母花岗岩出露, 东北部为一套酸性火山岩系不整合覆盖在小坪煤系之上。它们属于同熔系列, 其中石英斑岩对成矿贡献最大, 矿体即分布在内外接触带上。

2 包裹体的基本特征

2.1 熔融包裹体

熔融包裹体是岩浆作用过程中因矿物产生缺陷, 熔融体被包裹在矿物中固化而成, 从岩浆作用早期副矿物形成阶段直到造岩矿物石英大量产生阶段, 这种包裹体均有出现, 但岩浆早期产生的熔融包裹体和岩浆晚期产生的熔融包裹体在形成温度、形态和种类上都有很大差异。

(1) 锆石中熔融包裹体特征 锆石是岩浆早期析出的副矿物, 其内包裹体的特征反映了早期岩浆阶段熔融体的特征。火山岩中锆石多为细条状, 长: 宽为 7: 1 左右, 反映了岩浆冷凝速

* 国家自然科学基金资助项目

李兆麟, 男, 62 岁, 教授, 从事实验地球化学研究。邮政编码: 510275

1993-4-5 收稿, 1994-4-12 修改回。徐川, 刘浩龙编辑

度快,形成温度高的特征。锆石内包裹体多为长条状,沿 c 轴分布,多由三相组成,其中 $V+A+C_{Si}$ (其中 V 为气相, A 为非晶质, C 为结晶质, Si 为硅质) 占多数,少数由 $V+C_{Si}+A_{Fe}$ (Fe 为铁质) 组成。气体呈长条状、筛孔状、团块状集中在包裹体中或呈分散状分布在包裹体的端部,有些呈孔状分散在整个包裹体中,含量变化较大,一般在 $10\% \sim 30\%$ 左右,玻璃质一般含量较少,约占 $5\% \sim 10\%$ 左右,集中分布在包裹体的一端,结晶质占多数,含量在 $60\% \sim 85\%$ 左右。除三相包裹体外,还有由 $V+C_{Si}$ 组成的两相包裹体,但所占的比例只有 $20\% \sim 30\%$ 。锆石中包裹体的种类及特征见表 1。

表 1 火山岩中锆石内包裹体种类及其特征

Table 1. Types and characteristics of inclusions in zircon from volcanic rocks

种 类		比例 (%)	相态及比例 (%)	特 征	备 注
固体包裹体		5~10	一相	早期结晶的磷灰石及锆石小晶体	锆石结晶时,以机械方式捕获的早期结晶副矿物
熔 融 包 裹 体	二相包裹体	20~30	$V+C_{Si}$ $V:15$	气体分布在边缘或呈分散状分布在内部	V : 气体; C_{Si} : 结晶质
	含玻璃质包裹体	40~50	$V+C_{Si}+A$ $V:10 \sim 30$ $A:5 \sim 10$	气体呈长条状、筛状、团块状分布,玻璃质多集中分布	A : 玻璃质折光率小于锆石
	含铁质硅酸盐包裹体	10~20	$V+C_{Si}+A_{Fe}$ $V:10 \sim 30$ $A_{Fe}:5 \sim 10$	气体和结晶质特征与上述相同。 A_{Fe} : 铁红色	A_{Fe} : 含铁质的硅酸盐不混熔相

斑岩内锆石中包裹体数量较多,多由三相组成,即 $V+A+C_{Si}$, $V+C_{Si}+A_{Fe}$, $V+C_{Si}+C_{Li}$ (Li 为流体相)。包裹体特征见表 2。

表 2 斑岩内锆石包裹体特征

Table 2. Characteristics of inclusions in zircon from quartz porphyry

包裹体特征		比例 (%)	相态比 (%)	特 征
固体包裹体		10~20	一相	早期结晶的磷灰石及锆石
熔 融 包 裹 体	二相包裹体	5	$V+C_{Si}$ $V:10$	气体呈分散状
	含玻璃质三相包裹体	60~70	$V+C_{Si}+A$ $V:5 \sim 30; A:5 \sim 12$	玻璃质分布普遍,但含量较少,气体多呈筛孔状分布
	含铁质硅酸盐相的三相包裹体	8~10	$V+C_{Si}+A$ $V:10 \sim 30; A:10$	含铁质的硅酸盐相铁锈红色集中分布
	含流体相的三相包裹体	5~10	$V+C_{Si}+C_{Li}$ $V:10 \sim 30; C_{Li}:10$	C_{Li} 椭圆状,折射率小于主矿物

斑岩内锆石中包裹体为含有流体相的三相包裹体 $V+C_{Si}+C_{Li}$, C_{Li} 呈椭圆状分布在包裹体的一端,含量约 10% 左右,它的存在证实了不仅在岩浆结晶的晚期有熔体与溶液的分离,而且结晶作用的早期这种现象也是存在的,因为熔体与溶液的分离不仅取决于温度,而且与挥发分 (HCl 、 HF 、 H_2O 等) 和起助熔剂作用的碱金属含量的多少有关。对斑岩内石英中包裹体研究表明,石英斑岩相对比矿区出露的其它火成岩含子矿物的多相包裹体含量较多,溶液的浓度

较高,且在岩体顶部由构造作用所形成的低压部位比较集中,促使熔体与溶液的分离发生在岩浆早期。花岗岩锆石中包裹体数量最多,大小不等,形态各异(表3)。包裹体多由 $V+C_{Si}$ 组成,少数由 $V+C_{Si}+A$ 和 $V+C_{Si}+A_{Fe}$ 组成。其中气体含量最多,一般在 25% 左右,玻璃质含量只有 8% 左右,花岗岩锆石中还可可见卡脖子状包裹体,这表明花岗岩随着温度的下降,其内经历了塑性形变。

表 3 花岗岩中锆石包裹体特征

Table 3. Characteristics of inclusions in zircon from granite

包裹体特征		比例(%)	相态比例(%)	特 征
固体包裹体		10~20	一相	早期结晶的磷灰石及锆石晶体
熔 融 包 裹 体	二相包裹体	60~70	$V+C_{Si}$ $V:10\sim30$	气体呈分散状,团块状分布
	含玻璃质三相包裹体	5~10	$V+C_{Si}+A$ $A:8;V:20$	可见到卡脖子状包裹体,由塑性变形产生,玻璃质含量很少
	含 Fe 质硅酸盐三相包裹体	5~10	$V+C_{Si}+A_{Fe}$ $A_{Fe}:8;V:25$	玻璃质含量减少,且集中分布

(2) 石英中熔融包裹体特征 石英中熔融包裹体的特征代表了岩浆结晶中晚期阶段岩浆熔融物质的性质。深成岩、浅成岩、喷发岩中矿物结晶的温度、压力条件不同,因而其内所含的熔融包裹体特征也不相同(见表4)。

表 4 各岩体石英中包裹体特征

Table 4. Characteristics of inclusions in quartz from various intrusive masses

岩体	包裹体形态	包裹体大小(μm)	包裹体特征
流纹岩	水滴状	20~13.5	由 $V+A$ 组成, $V^{\text{①}}=5\%$, 玻璃质折光率小于石英
石英斑岩	椭圆状及似菱形	16~20	由 $V+A$ 组成, $V=25\%$, 玻璃质折光率小于石英; 由 $V+A+C_{Si}$ 组成, 结晶质为无色, 折光率大于主矿物, 玻璃质浅棕色, 折光率小于主矿物
花岗岩	似正方形及菱形	20~40	由 $V+C_{Si}$ 组成, $V:20\%\sim40\%$, 折光率略小于主矿物

①表中气相含量为气相占整个包裹体表面积的比例,并不代表其真正的含量

流纹岩石英中熔融包裹体很少,多由 $V+A_{Si}$ 两相组成,气相含量很少,这与喷发岩挥发分逸出最多、冷凝速度快有关。石英斑岩石英中所含的熔融包裹体有 $V+A$ 组成的二相包裹体和由 $V+A+C_{Si}$ 组成的三相包裹体,其中,二相包裹体内的气体含量大于喷出岩的二相包裹体的气体含量,反映了斑晶形成的深度介于深成岩与喷发岩之间的浅成部位,而三相包裹体的出现说明了有部分石英斑岩是在较深的部位形成的。花岗岩石英中包裹体由 $V+C_{Si}$ 组成,气相比例可达 40%,玻璃质消失,说明了矿物形成时冷却结晶速度很慢,形成深度较大,因而气相含量也相应增加。

2.2 气液相包裹体

本矿区岩体及含钨硫化物石英脉原生包裹体主要类型有:

(1) 气液相包裹体 此类包裹体又可分为液相和气相包裹体两种,前者广泛出现于各类岩石和矿脉中,后者主要出现在石英斑岩和含矿的石英脉中。

(2) 含子矿物多相包裹体 这类包裹体仅出现在石英斑岩和含矿石英脉中,子矿物多为

NaCl 晶体,且含量较少。

(3)含液相CO₂包裹体 主要见于花岗岩石英和含矿石英脉中,包裹体体积小,且数量少。

(4)含有机质包裹体 有机质成分主要为CH₄,仅在矿体个别中段见到。

上述各类包裹体在岩体和矿脉中的特征见表5。

表5 岩体及矿脉气液相包裹体特征

Table 5. Characteristics of gas-liquid inclusions in quartz from intrusive masses and ore veins

样品名称	石英斑岩	花岗岩	石英闪长斑岩	含钨硫化物石英脉
观察矿物	石英	石英	石英	石英
包裹体类型及所占百分比(%)	液相,70 气相,10 含子矿物多相包裹体,20	液相,85 含液相CO ₂ 包裹体,10 含子矿物包裹体,5	液相	液相,85 气相,10 含子矿物多相包裹体,5 含液相CO ₂ 包裹体、含碳氢化合物包裹体
包裹体大小及所占百分比(%)	<25 μm,80 >25 μm,20	1~20 μm, 多4~10 μm	2~4 μm	>10 μm,20 <10 μm,80
气体含量(%)	15~25,90 >50,10	10~20	10~15	15~30,95 >50,5
包裹体形状	多数为椭圆,其次为不规则状,少数为负晶形	多为不规则状及椭圆状	不规则多边形	椭圆状,不规则次圆状
包裹体丰度	大量	多	少	多
分布特征	稠密均匀	密度中等	稀疏	密集

3 成岩成矿温度

3.1 锆石内包裹体测温

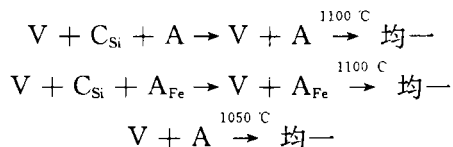
利用锆石内包裹体进行成岩温度测定,这在国内外是由我们首次进行的^[1],它对于探讨岩浆最高的成岩温度,了解岩浆冷凝固晶演化的机制,有着十分重要的意义,同时也是用来研究岩浆结晶分异作用有效的方法之一。锆石是一种透明度极高的副矿物,导热性良好,热膨胀系数小,能耐高温,它广泛存在于中酸性火成岩中,为成岩成矿实验的研究开拓了新的更广阔的领域。本文测温方法主要用淬火油浸法,个别良好晶体在高温加热台上用均匀法测定。淬火油浸法具有加热均匀,可长时间加温并具一定压力效应,使熔融包裹体易于产生相变及准确观察到每一阶段加温淬火后相变特征。

(1)灰白色火山角砾岩 火山角砾岩分布在矿区东北方向,不整合复盖于下侏罗统小坪煤系之上,并被花岗岩贯入。

角砾岩锆石中熔融包裹体(见表1),在加温过程中其相变特征如下:

加温至600℃,部分三相包裹体的气相扩散变得稀薄,玻璃质范围扩大;二相包裹体的气体呈半圆形收缩或集中,变成条带状。800℃时各包裹体出现明显的相变,玻璃质范围增加,含

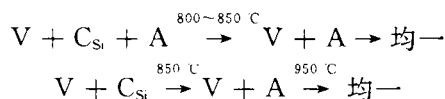
铁质的硅酸盐不混熔相变得更加明显,气体向边缘扩散,变得稀薄,有些二相包裹体中气体相消失。950℃时,部分包裹体淬火后出现新的气相,大多数包裹体结晶质与玻璃质界线不清。1000~1050℃时,大多数包裹体出现均一现象,淬火后出现多个气泡或气体呈旋涡状分布,含有 A_{Fe} 相的包裹体玻璃质为铁锈红色。1100℃时,所有的包裹体达到均一状态,淬火后都有多个气泡并存,或呈串珠状、云雾状分布,其相态变化为:



角砾岩锆石包裹体测温结果表明,本区火山岩最高成岩温度为1100℃(见图1a)。

(2) 石英斑岩 石英斑岩为浅成相侵入岩,成岩作用过程中物理化学条件变化比较大,锆石内包裹体形态各异,多为椭圆状、长条状。含有结晶质的包裹体在800~900℃时结晶质明显地向玻璃质转变,两者界线模糊不清,气体开始扩散变得稀薄。一般800~850℃是气体开始扩散的温度,900~950℃是包裹体部分出现均一的温度,淬火后,在边缘一侧出现气泡,而另一侧气体呈旋涡状分布,这表明此时包裹体内熔融体还没有达到塑性流动状态,从而使气体在迅速冷却时集中。1000℃时,各个包裹体基本均一,除产生多个气泡共存的现象外,还可以见到大气泡周围有小气泡呈放射串珠状分布,表明包裹体曾达均匀状态。由于包裹体中熔体密度较大,气体未能及时集中。

加温过程中锆石由包裹体相态变化为:



锆石包裹体测温结果表明,石英斑岩最高成岩温度为1000℃左右(见图1)。

(3) 花岗岩 花岗岩为深成相侵入体,形成时的物理化学条件相对比较稳定,锆石内包裹体数量一般较多。

加温至850℃时,由二相组成的包裹体气体部分开始扩散,结晶质开始向玻璃质转变,三相包裹体无明显的变化。900℃二相包裹体开始出现均一现象,表现为淬火后气体部分开始集中。三相包裹体气体扩散,含铁质硅酸盐相范围增大,结晶质开始缩小。950℃时,二相包裹体已完全达到均一状态,气体占表面积的20%左右,三相包裹体只有少数达到均一态,淬火后可见串珠状气泡出现,这表明,此温度下熔融体已具有塑性流动性质。1000℃时,所有包裹体均达到均一态,气相表现为多个气泡并存,熔融体为浅的铁锈红色,包裹体相态变化同石英斑岩。

花岗岩锆石包裹体测温结果表明,花岗岩成岩的最高温度为950~1000℃(详见图1)。

3.2 石英中熔融包裹体测温

各岩体熔融包裹体特征及热动过程中的相态变化见图2。

火山岩石英中熔融包裹体在800℃时发生明显的相变,气相扩散变得稀薄,玻璃质为淡褐

色。900℃时玻璃质淡褐色减少,中间出现两条暗褐色条带。1000℃时,气相仅阴影可见,玻璃质呈灰色。1050℃时,整个包裹体被暗色灰色物质所充填。

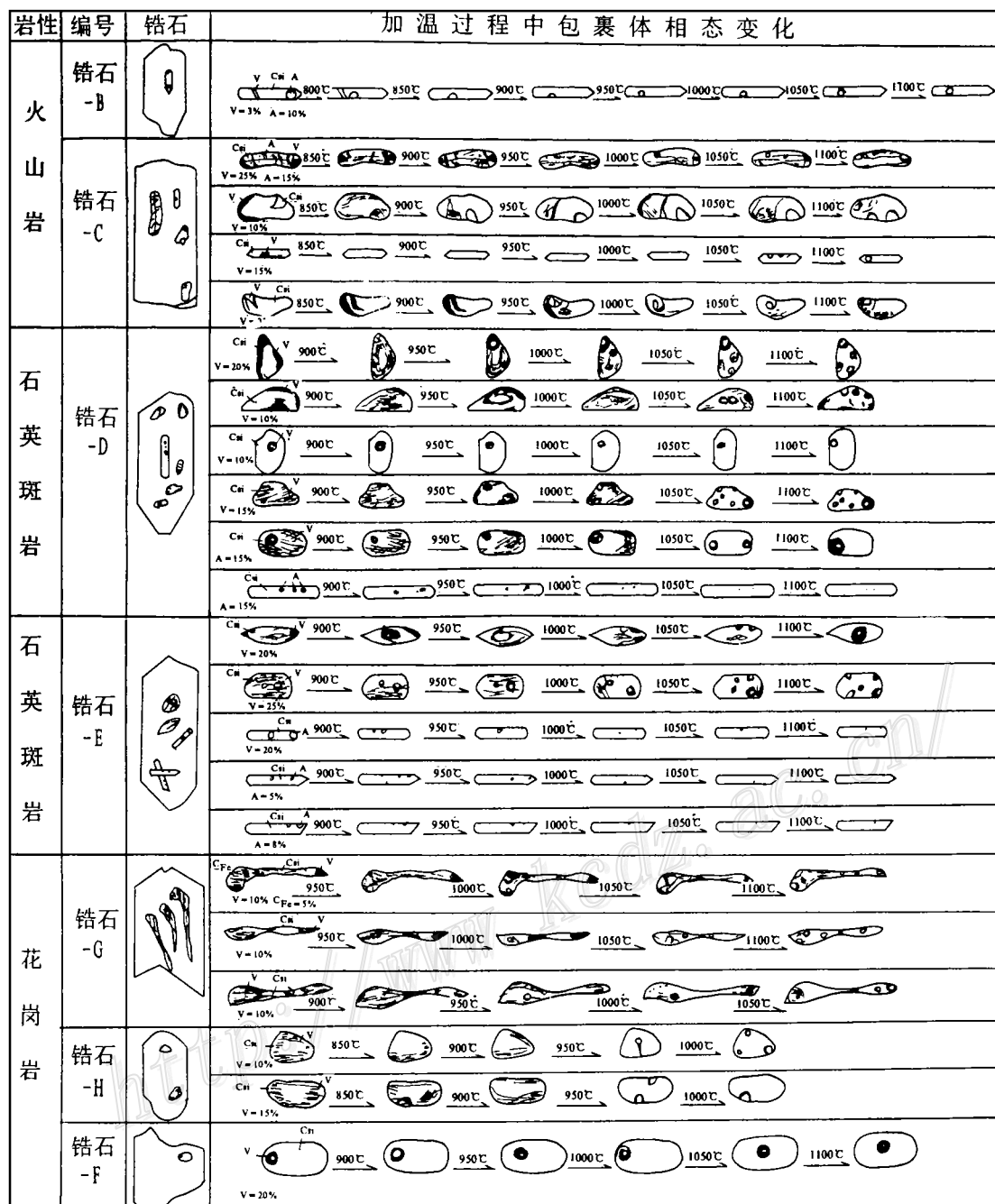


图1 锆石中熔融包裹体热动变化状态示意图

Fig. 1. Thermodynamic variations of melting inclusions in zircon.

石英斑岩中熔融包裹体在温度升至 700 ℃ 左右相变明显, 气体发生扩散, 760 ℃ 时, 气体变得很稀薄, 使整个包裹体呈暗灰色, 860 ℃ 即达均一。

花岗岩中熔融包裹体在 760 ℃, 分布在边缘的气体开始向中心扩散, 呈筛孔状分布的气体面积增大, 界线模糊不清, 820 ℃ 时, 整个包裹体为灰色物质充填。

熔融包裹体测温结果表明, 从喷发岩 → 浅成岩 → 深成岩, 石英结晶的温度依次下降, 它代表岩浆作用较晚期造岩矿物的形成温度。

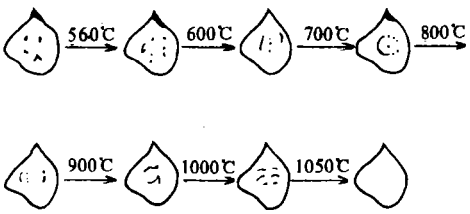
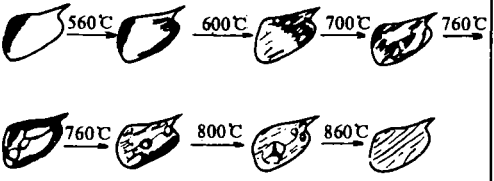
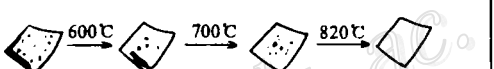
岩体	包裹体特征	加温过程中包裹体相态变化	均一温度
流纹岩	水滴状 $20 \times 23.5 \mu\text{m}$ $V+A, V=5\%$ 呈分散状分布		1050℃
石英斑岩	椭圆状, $16 \times 16 \mu\text{m}$ $V+C_{\text{Si}}, V=15\%$ 集中分布于包裹体一端		860℃
花岗岩	圆形, $15 \times 10 \mu\text{m}, V=20\%$, 气体分布在包裹体四周 菱形, $15 \times 10 \mu\text{m}, V+C_{\text{Si}}$ $V=20\%$, 气体呈星散状分布		820℃

图 2 石英中熔融包裹体热动变化状态示意图

Fig. 2. Thermodynamic variations of melting inclusions in quartz.

3.3 石英中气液相包裹体测温

对岩体中石英、岩体内石英脉、含矿石英脉进行温度测定的结果表明: 石英斑岩中原生包裹体均一温度范围大, 从 520 ℃ 至 230 ℃, 最佳区间为 230~270 ℃, 花岗岩为 150~210 ℃, 两者较大的温差反映了形成条件上的差异(表 6)。石英斑岩为浅成相, 岩体自上而下冷凝速度不一致, 上部由于挥发分大量逸失, 岩浆冷却时, 结晶线上移, 结晶温度升高。加温过程中气相不断地跳动, 也证实了沸腾状态的存在。

对脉石英测温及其它方面研究表明^[2,4], 含矿石英脉与石英斑岩有着内在的成因联系。

上述研究成果表明石英斑岩中石英的熔融包裹体始熔温度为 700 ℃, 均一温度为 860 ℃。气-液相包裹体均一温度为 480~110 ℃, 含矿石英脉为 450~140 ℃, 这反映出岩浆入侵后从

熔体往流体演化温度规律下降的关系。其中岩体中石英与含矿石英脉形成温度相近似。此外，据已有研究资料证明二者成矿溶液成分、微量气体成分及同位素均相近^[3]。这种近似性并非偶然，乃是石英斑岩入侵后，温度逐渐下降，产生局部岩浆分异作用，形成固体-熔体-流体或固体-流体平衡体系，在已结晶的固体矿物之间可以形成粒间熔体-流体或粒间溶液（含矿时称含矿粒间溶液），为本区斑岩钨矿形成提供主要成矿溶液来源。当含矿粒间溶液处于石英斑岩体已结晶矿物之间，随着温度下降在岩体内晶出，则可形成浸染状斑岩钨矿。当岩体受构造作用形成裂隙，处于岩体内高温高压条件下的粒间溶液则向裂隙低压系统运移、充填则形成岩体中含矿石英细脉或外带脉状钨矿。因此，本区斑岩型钨矿成矿溶液主要来自粒间溶液。斑岩体石英中气-液相包裹体均一温度是成岩温度下限，亦相当于浸染状斑岩钨矿成矿温度，略高于细脉浸染状或内外带脉状充填钨矿温度。故本区成岩与成矿作用具有同一性与延续性。

表 6 岩体与脉体石英形成温度表

Table 6. Quartz-forming temperatures of intrusive masses and veins

岩石名称	包裹体类型	温度区间(℃)	最佳区间(℃)	备 注
石英斑岩	气相包裹体	480~520	230~270	加温过程中常有气体跳动
	液相包裹体	230~310		
	次生包裹体	110~130		
含矿石英脉	气相包裹体	400~450	200~360	加温过程中常有气体跳动，并见有 CO ₂ 、子矿物及有机包裹体
	液相包裹体	200~360		
	次生包裹体	140~170		
花岗岩	液相包裹体	150~210	150~180	
	次生包裹体	90~110		
无矿石英脉	液相包裹体	170~200		花岗岩中石英脉
	次生包裹体	140		

4 结 论

(1)区内分布流纹岩、石英斑岩、花岗岩形成一个自喷出岩至侵入岩的岩浆演化系列。莲花山钨矿产于石英斑岩与其侵入围岩小坪煤系变质砂岩内外接触带。不同类型火成岩副矿物锆石、造岩矿物石英中存在二相或多相的熔融包裹体，少量熔融-流体包裹体。锆石中熔融包裹体均一温度可代表岩浆早期结晶温度。

(2)运用淬火油浸法测得不同类型火成岩锆石及石英中熔融包裹体均一温度：流纹岩 1100 ℃ 及 1050 ℃；石英斑岩 1000 ℃ 及 860 ℃；花岗岩 950~1000 ℃ 及 820 ℃。由喷出岩至侵入岩温度依次下降，锆石中熔融包裹体均一温度比石英高 50~180 ℃。熔融包裹体初熔温度为 600~800 ℃。

(3)石英斑岩、花岗岩及含矿石英脉中存在不同类型气液相包裹体：气相包裹体、液相包裹体、含钠盐多相包裹体、含液态 CO₂ 液相包裹体、含碳氢化合物包裹体。岩体中石英与其含矿石英脉或无矿石英脉中气-液包裹体类型及相态比例具相似性，反映出二者具亲缘关系。

(4)石英斑岩中气液相包裹体均一温度为 520~230 ℃，最佳为 230~270 ℃；含矿石英脉为 450~200 ℃，最佳 200~360 ℃。花岗岩石英及其脉石英中气液包裹体均一温度分别为 150

~210 °C 及 170~200 °C。岩体中石英与含矿石英脉包裹体均一化温度相近,证明岩浆冷凝过程形成粒间溶液,本区成矿溶液来源主要与石英斑岩产生局部岩浆分异作用形成的含矿粒间溶液有密切关系。

参 考 文 献

- 1 李兆麟. 岩浆岩副矿物包裹体成岩温度测定新方法及其应用. 中国科学, 1986, (12): 1327~1334
- 2 李兆麟. 粒间溶液与成矿作用. 地质学报, 1982, (2): 189~201
- 3 李兆麟, 杨忠芳. 广东莲花山钨矿成矿机制探讨. 地质找矿论丛, 1992, 7(1): 63~70
- 4 Falloon T J, Green D H. Earth and Planetary Science letters, 1986/87, (81): 95~103

A STUDY OF ROCK-FORMING AND ORE-FORMING TEMPERATURES OF THE LIANHUASHAN TUNGSTEN DEPOSIT, GUANDONG PROVINCE

Li Zhaolin

(Department of Geology, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

Yang Zhongfang

(China University of Geosciences, Beijing)

Key words: inclusion, rock-forming temperature, intergranular solution, Lianhuashan tungsten deposit

Abstract

The Lianhuashan tungsten deposit occurs in the volcanic terrain of the southeast coastal area of China, where rhyolite, quartz porphyry and granite form a magmatic evolution series. Orebodies occur at the endo- and exocontact zone between quartz porphyry and metasandstone of Xiaoping coal measures. Homogenization temperatures of melting inclusions in zircon and in quartz are 1100 °C and 1050 °C for rhyolite, 1000 °C and 860 °C for quartz porphyry, and 950~1000 °C and 820 °C for granite respectively, suggesting that rock-forming temperatures dropped successively from eruptive rocks to intrusive rocks, and that homogenization temperatures of melting inclusions in zircon are 50~180 °C higher than those in quartz. Homogenization temperatures of gas-liquid inclusions in quartz are 520~230 °C (the best being 230~270 °C) for quartz porphyry, 450~200 °C (the best being 200~360 °C) for ore-bearing quartz veins, 150~210 °C for granite and 170~200 °C for its vein quartz. Quartz from the quartz porphyry is similar to that from the ore-bearing quartz veins in inclusion types and homogenization temperatures, indicating that intergranular solution was formed during the cooling of magma and that ore-forming solution in this area was derived mainly from ore-bearing intergranular solution in the quartz porphyry.