

文章编号: 0258-7106 (2001) 03-0208-08

新疆乔尔山和粤西河台韧性剪切带金矿床中 熔融包裹体的发现及矿床成因*

李兆麟¹ 翟伟¹ 黄栋林² 赵文霞³ 杨荣勇¹ 全亚荣¹ 李文¹

(1 中山大学地球科学系, 广州 510275; 2 广东高要河台金矿, 肇庆 516100;

3 中山大学测试中心, 广州 510275)

提 要 乔尔山和河台金矿床属典型韧性剪切带金矿床, 分别产于志留—泥盆系及震旦系云开群地层中。在 2 个矿床含金石英脉及糜棱岩中首次发现了熔融包裹体及流体-熔融包裹体, 对解决此类型矿床成因具重大意义。乔尔山金矿床包裹体均一温度: 熔融包裹体为 900 ~ 1100 °C, 液相包裹体为 285 ~ 390 °C; 河台金矿包裹体均一温度: 熔融包裹体为 870 °C, 不混熔液相包裹体为 530 °C, 液相包裹体为 180 ~ 350 °C。前者流体性质属 $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$ 体系; 后者流体性质属 $\text{K}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$ 体系。运用电子显微镜能谱对熔融包裹体矿物进行分析, 鉴定出石英、钾长石、硅灰石及铝硅酸盐等 9 种子矿物, 它们分别组成不同矿物组合, 为熔融包裹体在矿脉中存在提供了重要的实验依据。在变质深熔作用及强烈动力变质作用下, 沉积变质岩可以形成铝硅酸盐熔体, 具熔体-流体性质, 成矿与多阶段铝硅酸盐熔体及流体作用相关。

关键词 韧性剪切带 金矿床 熔融包裹体 成矿流体 矿床成因

中图分类号: P618 .51 ; P599

文献标识码: A

关于韧性剪切带金矿床成矿流体的来源, 研究者曾提出不同的观点: 地幔流体 (Cameron, 1988), 岩浆流体 (Cameron, 1987; 孙晓明, 1996), 变质流体 (De Ronde, et al., 1992), 天水 (Robert, et al., 1987), 岩浆水-变质水及大气降水的混合流体 (杨敏之等, 1996; 王鹤年等, 1992)。研究者在确定上述性质时, 多以流体包裹体的氢、氧、碳同位素资料研究为证据。这亦反映出剪切带金矿床成矿流体是复杂的, 具多期、多阶段、多来源的性质。剪切带金矿床有独特的成矿机制, 其成矿作用与强烈的构造运动及动力变质作用密切相关, 成矿空间与深大断裂相关。李兆麟等 (2000) 在研究新疆南天山东段乔尔山及孔雀沟韧性剪切带金矿床时, 首次在含金石英脉中发现了熔融包裹体及流体-熔融包裹体。1999 年进行了一系列的研究工作, 又在河台韧性剪切带金矿床含金石英脉及糜棱岩中发现了熔融包裹体和流体-熔融包裹体。这些发现为韧性剪切带金矿床的研究

提供了新的信息, 对矿床成因研究有重大意义。

1 矿床地质特征

乔尔山金矿床位于新疆吐鲁番市鄯善县城南约 180 km, 地处天山东部中天山地体与南天山弧后盆地接触带附近。矿床产于 NWW 向展布的走向滑移脆性剪切带中, 受剪切变质的岩石主要是志留—泥盆系弧后盆地相的陆源碎屑岩夹火山碎屑岩及海西期的花岗闪长岩 (图 1)。剪切带走向 NWW 向, 长约 100 km, 宽约 10 km。剪切运动方向以右旋平移剪切为主, 局部表现出由 SW 向 NE 的强烈推覆剪切作用, 沿剪切带发育糜棱岩系列岩石, 出现许多典型的剪切变形组构。性质不明的推测断层将金矿床分为南北两部分。南部矿体分布于志留—泥盆系, 为平行于剪切带面理的石英脉或破碎带蚀变岩型矿体; 北部矿体主要分布于受推覆剪切的闪长岩体中

* 国家自然科学基金 (编号: 49873018, 49703043)、高等学校博士学科点专项研究基金 (编号: 98055807) 和广东省自然科学基金 (编号: 001255) 资助项目。

第一作者简介 李兆麟, 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 国际矿物协会 (IMA) 矿物包裹体专业委员会副主席, 地球化学专业。

收稿日期 2000-07-26; 改回日期 2001-05-12。张绮玲编辑。

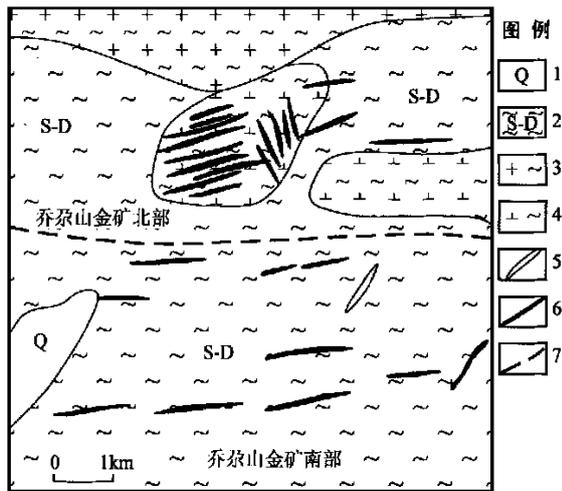


图 1 新疆乔尔山金矿床地质略图

1—第四系; 2—志留—泥盆系; 3—糜棱岩化花岗岩; 4—糜棱岩化闪长岩; 5—辉绿岩; 6—含金石英脉; 7—推断断层

Fig. 1 Geological sketch map of Qiaogashan gold deposit, Xinjiang

1—Quaternary; 2—Silurian-Devonian; 3—Mylonitized granite; 4—Mylonitized diorite; 5—Diabase; 6—Auriferous quartz vein; 7—Inferred fault

或岩体与变质岩的接触带中,属脆性共轭剪切断裂中的石英脉型或破碎带蚀变岩型矿体。志留—泥盆系岩石遭受区域变质及动力变质作用,达绿片岩相。

河台金矿床位于广东肇庆城西北 110 km 处,是一个典型的韧性剪切带型金矿床。矿床位于河台韧性剪切带中,地处四会—吴川断裂西北侧广宁—罗定断裂中部(图 2)。区内出露震旦系云开群,含矿岩石与糜棱岩、混合岩、混合花岗岩呈渐变过渡关系,矿体严格受糜棱岩带控制,矿区加里东期、海西期花岗岩体发育。区域岩石经历了自晋宁运动至燕山运动的多期构造变质和动力变质作用(剪切运动)。

2 研究方法及精度

流体包裹体及熔融包裹体均一温度在西德莱兹厂生产的 T1350 型高温热台上进行,测温上限可达 1600 °C,误差小于 3.0%。流体包裹体液相成分用原子吸收光谱及离子选择性电极分析,微量气体用气相色谱分析。乔尔山金矿床气液相包裹体成分由南京大学内生金属矿床国家重点实验室测定,阳离子用 JY38S 型 ICP-AES 仪分析,分析误差小于 2.0%;阴离子用 KYSIC-1 型离子色谱仪测定,分析误差小

于 3.0%;气相成分用 CXL-101 型气相色谱仪测定,分析误差小于 5.0%。河台金矿流体包裹体成分由中南工业大学测定,气相成分用美国 Varian 公司生产的 SP-3400 型气相色谱仪测定,液相成分用国产 AA7003 型全自动原子吸收光谱仪测定,测试精度约为 0.01×10^{-6} 。熔融包裹体成分分析仪器为 Link-ISIS300 能量谱仪,工作条件为加速电压 20 kV,在真空条件下对样品喷碳,并在扫描电子显微镜下观察分析。

3 含矿石英脉及糜棱岩石英脉中包裹体特征

3.1 包裹体特征

在 2 个地区的石英脉及糜棱岩矿物中均发现熔融包裹体、流体熔融包裹体及气-液相包裹体,其特征如表 1。

气-液相包裹体($L + G, L + L_{CO_2} + G_{CO_2}, L_1 + L_2 + G$) 在 2 个矿床含金石英脉及糜棱岩中均有分布,在成因类型上分原生、次生及假次生。原生气-液相包裹体常与熔融包裹体及流体-熔融包裹体共生,属熔体与溶液分离产物。乔尔山金矿气-液相包裹体中含较多 CO_2 液相包裹体,而河台金矿则较少,且气-液相包裹体中含不混溶液相包裹体及有机包裹体。不混溶液相包裹体由两种密度不同的液相和气相组成($L_1 + L_2 + G$),气相与低密度液相(L_2)的局部均一温度为 150 °C,而不混溶液相 L_1 及 L_2 的均一温度为 530 °C,属超临界流体(谢鸿森等,1999;龚庆杰等,1999)。此外不混溶液相包裹体中常含碳氢化合物,其来源主要为原沉积变质岩或岩石中碳酸盐及含水矿物在高温高压条件下分解产生的 H_2O 和 CO_2 ,两者在高温下气体反应可形成 CH_4 ($CO_2 + 2H_2O = CH_4 + 2O_2$),此种 CH_4 属无机成因(Weng et al.,1999)。

2 个矿区含金石英脉及河台糜棱岩中均有熔融包裹体($A_{Si} + G, A_{1Si} + A_{2Si} + G, A_{Fe+Si} + G, A_{Fe+Si} + A_{Si} + G, A_{Si} + A_{Fe+Si}$) 分布。在乔尔山金矿,熔融包裹体相组成较为简单,主要为两相熔融包裹体,由非晶质硅酸盐(A_{Si})、气相(G)组成。在河台金矿中其相组成较为复杂,有两相及三相熔融包裹体,主要由非晶质固相硅酸盐(A_{Si}),非晶质含铁硅酸盐(A_{Si+Fe})及气相以不同比例组合而成。包裹体中相比例不均匀,一般非晶质固相 > 气相, $\phi_{气相} = 5\% \sim 30\%$,少数

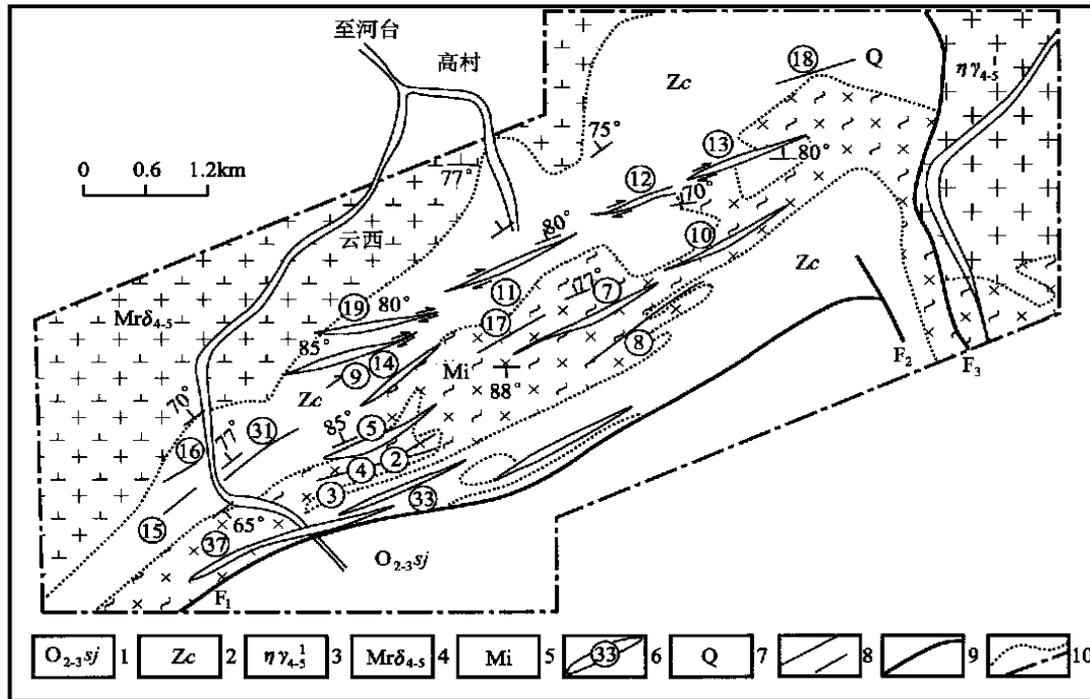


图2 河台金矿区地质图

1—中上奥陶统三尖群绢云千枚岩、石英岩夹页岩；2—震旦系云母石英片岩；3—海西-印支期二长花岗岩；4—海西-印支期混合花岗岩及片麻岩；5—花岗混合片麻岩；6—韧性剪切带及金矿床编号；7—石英脉型金矿；8—区域片理(一般为C面理)；9—断层；10—矿区范围及岩性过渡界线

Fig. 2 Geological map of Hetai gold deposit

1—Sericite phyllite and quartzite intercalated with shale of Middle-Upper Ordovician Sanjian Group; 2—Sinain mica-quartz schist; 3—Hercynian-Indosinian monzonitic granite; 4—Hercynian-Indosinian migmatized granite and gneiss; 5—Granitic migmatized gneiss; 6—Ductile shear zone and serial number of gold deposit; 7—Quartz vein type gold deposit; 8—Regional schistosity; 9—Fault; 10—Limits of the ore district and lithologic transitional boundary

表1 乔尔山及河台金矿床矿物包裹体特征

Table 1 Characteristics of inclusions in minerals from the Hetai and Qiaogashan gold deposits

矿床名称	包裹体类型	相态特征	大小/ μm	形态	成因类型
乔尔山金矿					
	液相包裹体	$L + G(10\% \sim 30\%)$	$3 \times 5 \sim 20 \times 30$	圆形, 三角形, 不规则状, 椭圆形	原生, 次生, 假次生
	含 CO_2 液相包裹体	$L + L_{\text{CO}_2} + G_{\text{CO}_2}(10\% \sim 20\%)$	$3 \times 5 \sim 10 \times 25$		原生
	熔融包裹体	$A_{\text{Si}} + G(<10\%)$	$2 \times 3 \sim 10 \times 15$		原生
	流体-熔融包裹体	$L + C_{\text{Si}} + G(5\% \sim 10\%)$	$5 \times 10 \sim 20 \times 30$		原生
河台金矿					
	液相包裹体	$L + G(5\% \sim 30\%)$	$2 \times 3 \sim 60 \times 60$	圆形, 椭圆形, 不规则带状, 三角形, 长条形	原生, 次生, 假次生
	不混溶液相包裹体	$L_1 + L_2 + G(20\%)$	$10 \times 15 \sim 50 \times 60$		原生
	两相熔融包裹体	$L_1\text{G}_{\text{Hf}} + L_2\text{G}_{\text{Hf}}$ $A_{\text{Si}} + G, 4A_{\text{Si}} + G, A_{\text{Si}}(C_{\text{Si}}) + G$ ($G=10\% \sim 50\%$)	$2 \times 3 \sim 20 \times 60$	圆形, 椭圆形, 不规则带状, 三角形, 长条形	原生
	三相熔融包裹体	$A_{\text{Si}} + G(20\% \sim 30\%)$ $A_{\text{Fe+Si}} + A_{\text{Si}} + G, A_{1\text{Si}} + A_{2\text{Si}} + G,$ $A_{\text{Si}} + C_{\text{Si}} + G(5\% \sim 40\%)$	$5 \times 25 \sim 15 \times 20$		假次生 原生
	流体-熔融包裹体	$C_{\text{Si}} + L, A_{\text{Si}} + L + G_{\text{G}_{\text{Hf}}}(10\% \sim 20\%)$	$10 \times 25 \sim 60 \times 60$	原生	

注: L—液相; G—气相; A—非晶质; C—晶质; Fe—铁质; Si—硅酸盐; L_1, L_2 —两相不混溶液相; G_{Hf} —碳氢化合物

分 $\varphi_{\text{气相}} = 60\% \sim 80\%$ 。上述熔融包裹体相组成表明石英脉是由高温硅酸盐熔融体形成的,熔融体性质属熔体-溶液。由于冷却速度比较快,熔融包裹体中固相多属非晶质,其相比例变化较大,反映出该硅酸盐熔融体具不均匀性和非混溶性。石英脉中熔融包裹体体积较小,直径几微米至 $20 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,最大达 $20 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$,大部分为微米级,因此不易识别。

在河台金矿中还存在假次生成因熔融包裹体,属两相熔融包裹体($nA_{\text{Si}} + G$),体积较大, $6 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m} \sim 20 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$,不规则状、圆形、椭圆形,沿裂隙分布,表明该区硅酸盐熔融体活动有多阶段性。

流体-熔融包裹体($A_{\text{Si}} + L + G, C_{\text{Si}} + L, L + G + C_{\text{Si}}, A_{\text{Si}} + L_{\text{CH}_4}, L + 4A_{\text{Si}}$) 在含矿石英脉中分布不广,其相态特征主要由固相非晶质(A_{Si})、晶质(C_{Si}) + 液相(L) + 气相(G),或晶质(C_{Si})、非晶质(A_{Si}) + 液相(L)组成,体积较大, $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m} \sim 60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$,气相体积分数 $\varphi_{\text{气相}} = 5\% \sim 25\%$,常与熔融包裹体及液相包裹体共存,属硅酸盐熔融包裹体与流体相分熔的产物。此类型包裹体相态特征在 2 个矿床略有差异,乔尔山金矿包裹体中液相比例较大,固相多为非晶质;河台金矿固相比例较大,液相常含碳化氢化合物,其相组成为 $C_{\text{Si}} + L + G, A_{\text{Si}} + L_{\text{CH}_4} + G$ 。

3.2 熔融包裹体及液相包裹体均一温度测定

熔融包裹体及液相包裹体均一温度如表 2。2

个金矿床液相包裹体均一温度相似, $180 \sim 390 \text{ }^\circ\text{C}$, 为成矿溶液存在温度范围。河台金矿床不混溶液相包裹体气相与液相局部均一温度为 $150 \text{ }^\circ\text{C}$, 不混溶液相均一温度为 $530 \text{ }^\circ\text{C}$, 属超临界流体温度。熔融包裹体及流体-熔融包裹体均一温度在乔尔山比较高, 达 $560 \sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$, 河台为 $600 \sim 870 \text{ }^\circ\text{C}$ 。两地区剪切带金矿床形成石英脉硅酸盐熔融体温度可达 $870 \sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.3 矿物包裹体成矿溶液及微量气体成分分析

根据包裹体成矿溶液及微量气体成分分析,按其含量高低排列 2 个金矿床各组分变化序列(表 3)。成矿流体的性质有所不同,乔尔山金矿成矿流体属 $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$ 体系,以 $\text{Na}^+、\text{K}^+$ 为主, Na^+ / K^+ 比值为 2.68;河台金矿成矿流体属 $\text{K}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$ 体系,以 $\text{K}^+、\text{Ca}^{2+}$ 为主, Na^+ / K^+ 比值为 0.46。但两者阴离子序列相同,以 $\text{SO}_4^{2-}、\text{HCO}_3^-、\text{Cl}^-$ 为主,反映出金的亲和性。另外,它们的微量气体组分相似,并且均含 CH_4 ,河台金矿还含 $\text{C}_2\text{H}_2、\text{C}_2\text{H}_6$ 有机组分。据近期张铭杰(2000)对地幔稀有气体研究, H_2 及 $\text{CH}_4、\text{C}_2\text{H}_6$ 等烃类气体为地球原始气体,属非生物成因。此外翁克难在高温高压实验中证明地壳深部碳酸盐和水或含水矿物质反应可以形成碳化氢(烃)类化合物(Weng et al., 1999),反映出剪切带流体可来自深源。

表 2 乔尔山及河台金矿不同类型包裹体均一温度

Table 2 Homogenization temperatures of different types of inclusions in the Hetai and the Qiaogashan gold deposits

矿床名称	包裹体类型	均一温度/ $^\circ\text{C}$	爆裂温度/ $^\circ\text{C}$	爆裂温度测定
乔尔山金矿	液相包裹体(L + G) 熔融包裹体($A_{\text{Si}} + G$)	285 ~ 390 900 ~ 1100	300 ~ 500	中山大学蒋浩深
河台金矿	液相包裹体(L + G) 二相不混溶液相包裹体($L_1 + L_2 + G$) 有机包裹体(L + G_{CH_4}) 熔融包裹体($A_{\text{Si}} + G$) 流体-熔融包裹体(L + A_{Si})	180 ~ 350 530 160 870 > 600	198 ~ 416	中国科学院地质研究所 范宏瑞

表 3 矿物包裹体成矿溶液及微量气体组分变化序列

Table 3 Sequence of gas and liquid composition of ore-forming fluids in the Hetai and the Qiaogashan gold deposits

矿床名称	元素组分变化序列		
乔尔山金矿	$\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$	$\text{H}_2\text{O} > \text{CO}_2 > \text{CO} > \text{CH}_4$
河台金矿	$\text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$	$\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$	$\text{H}_2\text{O} > \text{CO}_2 > \text{CH}_4 > \text{H}_2 > \text{CO} > \text{C}_2\text{H}_2 > \text{C}_2\text{H}_6 > \text{O}_2 > \text{N}_2$

注: 乔尔山金矿样品由南京大学地球科学系赵梅芳、蒋浩深分析,河台金矿样品由中南工业大学万方、刘伟分析。

3.4 矿物中熔融包裹体电子显微镜观察及能谱成分分析

为了进一步证实乔尔山及河台剪切带金矿床熔融包裹体及流体-熔融包裹体的存在,选择乔尔山及河台含金石英脉及糜棱岩包裹体薄片,进行熔融包裹体扫描电子显微镜观察及能谱成分分析,获得良好结果。

共测包裹体薄片4块,16个包裹体,测点60个,鉴定钾长石、石英、硅灰石及不同类型铝硅酸盐共9种矿物,各子矿物在包裹体中分别形成石英+含铁富硫钙铝硅酸盐,硅灰石+石英,钾长石+石英+含钾钠富铁铝硅酸盐,石英+钾长石,石英,钾长石+含钠富钾铁铝硅酸盐,石英+含硫富钠铝硅酸盐等组合,各子矿物成分列于表4。

石英 是2个金矿床熔融包裹体中分布较广的子矿物。子矿物中SiO₂含量较低, $w(\text{SiO}_2) = 91.76\% \sim 98.01\%$,主矿物石英 $w(\text{SiO}_2) = 94.78\% \sim 98.79\%$ 。子矿物石英中含较多K、Na、Ca、Fe、Mg、S等杂质元素,而主矿物则主要含Al、Na、P,反映出原始硅酸盐熔浆中含较多杂质元素。相比之下,河台金矿石英子矿物SiO₂含量较乔尔山金矿高,而其它杂质元素除Fe、Zn外均较后者低。其差异原因与形成硅酸盐熔体的物质来源不同有关。

钾长石 在2个矿床熔融包裹体中均有分布,

分别与石英及铝硅酸盐形成不同矿物组合,其化学成分 $w(\text{SiO}_2) = 52.84\% \sim 64.67\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 24.84\% \sim 32.41\%$, $w(\text{K}_2\text{O}) = 8.04\% \sim 9.87\%$,并含Na、Fe、Ca、Mg、SO₃、Cr₂O₃等微量组分。主要组分SiO₂在河台金矿比乔尔山金矿低,但Al₂O₃及K₂O则相反。微量组分除Na外,河台金矿均较乔尔山金矿高,且河台金矿熔融包裹体钾长石中含微量Cr₂O₃,具深源的特征。

铝硅酸盐 属在包裹体捕获硅酸盐熔融体析出子矿物后的残余熔浆组分,其成分比较复杂,含量变化大。河台金矿主要为含钾钠富镁铝硅酸盐、含铁硫富钙铝硅酸盐、含镁富铁铝硅酸盐和富铝硅酸盐;乔尔山金矿则为含钾富钠铁铝硅酸盐和含硫富钠铝硅酸盐,其化学组成主要为SiO₂、Al₂O₃及Fe₂O₃,其中 $w(\text{SiO}_2) = 67.85\% \sim 75.36\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 6.56\% \sim 12.01\%$, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 2.51\% \sim 8.83\%$, $w(\text{Na}_2\text{O}) = 0.47\% \sim 6.86\%$, $w(\text{K}_2\text{O}) = 0.90\% \sim 3.51\%$, $w(\text{CaO}) = 0.1\% \sim 3.03\%$,此外含微量Mg、S、Cr、P等杂质元素。两个矿床相比,河台金矿的铝硅酸盐Fe、Mg、Ca、Al含量较高,而乔尔山金矿床则Na、K、S、Si含量较高,反映出河台金矿硅酸盐熔浆偏基性,而乔尔山则较为酸性。

硅灰石(CaSiO₃) 仅见于河台金矿床0 m中段含矿石英脉的个别熔融包裹体中,化学组成为

表4 剪切带型金矿床含金石英脉熔融包裹体电子显微镜能谱分析结果 (wt%)

Table 4 SEM energy spectrum analyses (%) of melt inclusions in gold-bearing quartz veins of the Hetai and the Qiaogashan gold deposits

成分	乔尔山金矿床				河台金矿床				
	钾长石	石英	铝硅酸盐	石英主矿物	钾长石	石英	硅灰石	铝硅酸盐	石英主矿物
Al ₂ O ₃	24.84	1.42	6.56	1.22	32.41	0.63	—	12.01	0.47
SiO ₂	64.67	91.78	75.36	94.78	52.84	98.01	30.5	67.85	98.79
Na ₂ O	0.99	2.27	6.87	3.44	0.97	0.26	—	0.47	0.47
K ₂ O	8.04	0.39	3.51	—	9.87	0.10	—	0.9	—
TiO ₂	0.98	0.02	—	—	—	—	—	—	—
Fe ₂ O ₃	0.51	0.19	2.51	—	1.09	0.46	—	8.83	—
CaO	0.14	1.41	0.10	—	0.36	0.09	67.31	3.03	—
MnO	—	—	—	—	—	—	1.26	—	—
MgO	0.22	0.34	0.47	—	0.73	0.02	—	2.63	—
BaO	—	0.16	—	—	—	—	—	—	—
SO ₃	0.56	1.93	3.01	0.48	0.76	0.26	0.93	1.57	—
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	0.83	—	—	0.425	—
P ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	0.53	0.26
ZnO	—	—	—	—	—	0.01	—	0.08	—
合计	99.96	99.91	99.25	99.92	99.86	99.84	100	98.33	99.99
测定个数	4	10	2	4	3	7	1	4	4

分析者:中山大学测试中心赵文兰、李兆麟、翟伟。—为未测出者。

$w(\text{SiO}_2) = 30.5\%$, $w(\text{CaO}) = 67.31\%$, 含少量 $\text{MnO}(1.26\%)$ 及 P_2O_5 , 与主矿物成分有明显区别。此外, 在石英主矿物中亦鉴定出硅灰石固体矿物, 它早于主矿物形成, 属石英结晶时机械捕获固体包裹体, 硅灰石在石英脉中出现, 与深成变质作用有密切关系。

上述 2 个矿床的含金石英脉熔融包裹体子矿物分析结果为剪切带金矿床熔融包裹体的存在提供了有力的实验证据, 对此类型金矿床成因研究具有重大意义。

4 韧性剪切带金矿床成因讨论

有关剪切带金矿床成矿流体来源, 前人作了较多的研究工作(王鹤年等, 1989; 何绍勋等, 1996; 凌井生等, 1989), 提出了许多不同见解, 对此类矿床成因研究有重要贡献。但多数人认为成矿流体的性质是热液, 而非熔体-溶液。但笔者在两个剪切带型金矿床中均发现熔融包裹体及流体-熔融包裹体。本文研究的 2 个剪切带金矿床基底建造均属中元古界, 乔尔山金矿分布于志留-泥盆系, 河台金矿床产于震旦系云开群, 并处于深大断裂部位, 基底建造及盖层岩石中金含量较高, 区域地层经历长期的构造运动(从晋宁到燕山期)、变质作用、动力变质作用, 其中尤以海西期或海西-印支期最为强烈, 区域变质作用使地层岩石产生变质, 乔尔山达绿片岩相, 河台角闪岩相及混合岩。基底建造在加里东中期受区域变质作用, 岩石中的金开始遭受改造活化转移, 在基底变质岩、混合岩中有一定富集(王秀璋等, 1992), 海西期或海西-印支期构造运动较为强烈, 基底建造沉积变质岩、混合岩在强烈的变质深熔作用, 高温高压条件下, 可以产生熔融或局部熔融形成富水(富挥发分)的铝硅酸盐熔体(李兆麟, 1986, 1994, 2000; 王联魁等, 2000), 岩石中的金再次遭受改造活化并迅速往铝硅酸盐熔体中集中, 形成含金铝硅酸盐熔浆, 并沿构造裂隙往上运移, 在韧性断裂(河台)或剪切带上部脆性断裂带充填, 形成剪切带型含金石英脉(乔尔山)。

此外, 在河台金矿糜棱岩中亦发现熔融包裹体, 表明剪切动力变质作用过程曾产生铝硅酸盐熔体,

其形成机制更为复杂。河台金矿严格受 NE 向糜棱岩控制, 剪切构造动力变质作用对金矿形成起着重要作用。何绍勋在叙述韧性剪切带的构造化学作用过程中曾讨论到压熔及流变域处于超深构造层次, 物质可以呈局部熔融状态(何绍勋等, 1996)。河台断裂带是一典型深层韧性剪切带, 在强烈动力变质作用下, 岩石中矿物或早期形成的含金石英脉可以碎裂重熔, 形成铝硅酸盐熔体, 原岩及石英脉中的金可以发生活化转移, 在糜棱岩中富集。前人对河台金矿矿石微构造的研究表明, 糜棱岩中存在构造熔岩, 岩石剪切作用过程中糜棱岩带矿物曾产生局部熔融(何绍勋等, 1996)。高温高压轴压机剪切成矿模拟实验中亦证明, 伴随构造变形过程, 岩石中 SiO_2 及成矿元素迁移富集在裂隙中形成石英脉(吴学益等, 1995; 马瑞等, 1995)。这些研究为剪切压熔作用下硅酸盐熔体的形成提供了实验依据。河台金矿不同类型矿物中熔融包裹体均一温度 870°C , 流体-熔融包裹体均一温度大于 600°C , 表明河台铝硅酸盐熔浆形成温度近于 850°C 。温度、压力下降会产生熔体与液相分离, 形成固-液平衡体系及不混溶液相-液相-气相平衡体系。液相可以呈粒间溶液在早期结晶矿物中存在, 与早期结晶矿物产生蚀变交代, 使金在矿物中活化转移, 从而在流体相中进一步富集成矿。后期的热液活动, 使糜棱岩再一次遭受蚀变交代作用, 金会进一步富集。

关于金矿床形成过程中金的迁移形式, 以往人们多注意金在热液中以与 S^{2-} 、 Cl^- 、 HS^- 等离子形成络合物的形式进行迁移。人们对金在流体相中的迁移研究较多, 但对在硅酸盐熔体中的迁移研究较少。樊文苓等(1993, 1999)研究 Au 与硅络合的迁移形式, 证明金在热液中可呈 AuH_3SiO_4 络合物形式迁移。金还可以纳米形式存在。近期在 $800 \sim 850^\circ\text{C}$ 、 $1.500 \times 10^5 \text{ Pa}$ 条件下, 进行金管实验^①, 表明岩石熔融的熔体产物中存在肉眼可见的金矿细脉, 此外较多的细小金粒出现在岩石熔体产物中, 这是由于金管在高温、高压下产生溶解, 转移到岩石熔体中析出。王鹤年(1989)在河台伟晶岩石英包裹体研究中证明伟晶岩阶段成矿流体富含金, 亦为高温、高压条件下, 金进入伟晶岩硅酸盐熔体提供了证据。综上所述, 在高温、高压条件下, 金可在硅酸盐熔体中

① Li Zhaolin, et al. 2000. A study on origin and rock-forming simulating experiment of aquamarine-bearing pegmatite of Ailaoshan, Yunnan, China. 31th International Geological Congress Abstracts, Brazil.

以自然金形式析出,部分在熔体分离液相中集中。据矿物中包裹体液相及微量气体分析,液相主要成分为 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 及 Cl^- ,微量气体主要为 H_2O 、 CO_2 及 CH_4 ,因此在流体相中金主要呈 $\text{Au}(\text{HS})^-$ 、 $\text{Au}(\text{HS})_2\text{S}^{2-}$ 、 $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 、 AuCOCl 、 AuCl_4^- 、 AuCl^- 等形式迁移,当温度、压力及介质 pH 值产生变化时,络合物分解形成自然金,富集成矿。

5 结 论

(1) 在韧性剪切带型乔尔山及河台金矿床含金石英脉及糜棱岩中发现熔融包裹体及流体-熔融包裹体,在国内外属首次,为此类型矿床成因提出了新依据,对剪切带金矿床形成机制及成因研究具重大意义。

(2) 据矿物包裹体均一温度测定,乔尔山金矿熔融包裹体为 $900 \sim 1100^\circ\text{C}$,气液相包裹体均一温度为 $285 \sim 390^\circ\text{C}$,河台金矿床熔融包裹体均一温度为 870°C ,流体熔融包裹体均一温度 $> 600^\circ\text{C}$,两相不混溶液相包裹体为 530°C ,液相包裹体为 $180 \sim 350^\circ\text{C}$ 。含金铝硅酸盐熔体形成温度达 $850 \sim 1100^\circ\text{C}$ 。

(3) 包裹体成矿溶液及微量气体分析表明乔尔山金矿成矿流体属 $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$ 体系,河台金矿成矿流体属 $\text{K}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$ 体系,前者富 Na^+ 、 K^+ ,后者富 K^+ 、 Ca^{2+} 。

(4) 运用电子显微镜能谱对 2 个矿床含金石英脉中的熔融包裹体子矿物成分进行了分析,鉴定出石英、钾长石、硅灰石及不同类型的铝硅酸盐,各子矿物的化学成分略有差异,与成矿地质条件及成矿机制不同相关,研究成果为剪切带金矿床熔融包裹体的存在提供了有力的实验证据。

(5) 剪切带型金矿床的形成与区域变质作用、动力变质作用密切相关。矿床基底建造及盖层沉积变质岩经长期构造运动改造,在变质深熔作用及强烈动力变质作用下沉积变质岩可以形成铝硅酸盐熔体,具熔体-溶液性质,成矿与多阶段铝硅酸盐熔体及流体作用相关。

(6) 实验研究表明金在高温、高压条件下可以在硅酸盐熔体中存在,Au 可以与硅酸形成 AuH_3SiO_4 络合物,在温度压力下降时,以自然金形式在熔体中析出。Au 在流体相中主要与 S、CO、Cl

形成络合物迁移。在温度、压力下降及介质 pH 值发生变化时,金析出富集成矿。

致 谢 在野外工作中得到广东高要河台金矿刘振升高级工程师及地测科广大地质人员的大力支持和帮助,特表谢忱。文中不当之处望读者指正。

参考文献

- 樊文苓,王声远,吴建军.1993.低温热液中金-硅络合作用的实验标定[J].科学通报,38(10):933~935.
- 樊文苓,王声远,田弋夫,等.1999.热液体系中硅的络合作用[J].矿物学报,19(4):390~398.
- 龚庆杰,岑况,陈明.1999.超临界流体与超临界现象[J].地球学报,20(增刊):438~444.
- 何绍勋,段嘉瑞,刘继顺,等.1996.韧性剪切带与成矿[M].北京:地质出版社.109~143.
- 李兆麟.1986.粒间溶液与成矿作用[J].地质学报,73(2):189~201.
- 李兆麟.1994.粒间溶液形成条件的实验研究[J].矿物岩石地球化学通讯,13(1):1~3.
- 李兆麟.2000.热液金刚石压腔(HDAC)在地质上的应用及甲烷水合物合成实验研究[J].地学前缘,17(1):271~285.
- 李兆麟,孙晓明,杨荣勇,等.2000.南天山韧性剪切带金矿床地质地球化学[M].广州:中山大学出版社.
- 凌井生,陈础廷,季明钧.1989.河台韧性剪切带蚀变糜棱岩型金矿床的地质特征、矿床成因与成矿模式[J].广东地质,7(3):109~143.
- 马瑞,姜琦刚.1995.浅变质岩区一类石英脉成因的实验研究[A].全国第四届构造地球化学学术讨论会论文集[C].贵阳:贵州科技出版社.79~84.
- 孙晓明,徐克勤,任启江,等.1996.吉南太古宙高级变质地体及金矿床[M].北京:地质出版社.
- 王鹤年,张景荣,戴爱华.1989.广东河台糜棱岩带蚀变岩型金矿床的地球化学研究[J].矿床地质,8(2):61~70.
- 王鹤年,张守韵,俞受,等.1992.华夏地块韧性剪切带型金矿地质[M].北京:科学出版社.
- 王联魁,黄智龙.2000.Li-F花岗岩液态分离与实验[M].北京:科学出版社.213~234.
- 王秀璋,程景平,张宝贵,等.1992.中国改造型金矿床地球化学[M].北京:科学出版社.51~58.
- 吴学益,冉清昌主编.1995.全国第四届构造地球化学学术讨论会论文集[C].贵阳:贵州科技出版社.70~72.
- 谢鸿森,苏根利,徐有生,等.1999.超临界流体与成矿作用[A].资源环境与可持续发展[C].北京:科学出版社.348~353.
- 杨敏之,吕古贤.1996.胶东绿岩带金矿地质地球化学[M].北京:地质出版社.
- 张铭杰,王先彬,李立武.2000.地幔流体组成[J].地学前缘,7(2):401~412.

- Cameron E M. 1988. Archean gold: Relation to granulite formation and redox zoning in the crust[J]. *Geology*, 16: 109 ~ 112.
- Cameron E M, Hattori K. 1987. Archean gold mineralization and oxidized hydrothermal fluids[J]. *Econ. Geol.*, 82: 1177 ~ 1191.
- De Ronde C E J, Spooner E T C, De Wit M J, et al. 1992. Shear zone-related, Au quartz vein deposit in the Barberton greenstone belt, south Africa: field and petrographic characteristics, fluid properties, and light stable isotope geochemistry[J]. *Econ. Geol.*, 87: 366 ~ 402.
- Robert F, Kelly W C. 1987. Ore-forming fluid in Archean gold-bearing quartz veins at sigma mine, Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada [J]. *Econ. Geol.*, 82: 1464 ~ 1482.
- Weng K N, Wang B S, Xiao W S, et al. 1999. Experimental study on hydrocarbon formation clue to reactions between carbonates and water or water-bearing minerals in deep earth[J]. *Chinese Journal of geochemistry*, 18(2): 115 ~ 120.

The Discovery of Melt Inclusions in Hetai and Qiaogashan Ductile Shear Zone Gold Deposits and the Genetic Study of These Deposits

Li Zhaolin¹, Zhai Wei¹, Huang Donglin², Zhao Wenxia³, Yang Rongyong¹,
Quan Yarong¹, Li Wen¹

(1 Department of Earth Sciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275; 2 Hetai Gold Mine, Gaoyao 526100;
3 Testing Center, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

Key words: ductile shear zone, gold deposit, melt inclusion, ore-forming fluid, ore genesis

Abstract

The Qiaogashan gold deposit and the Hetai gold deposit are two typical ductile shear gold deposits, which are hosted in Silurian-Devonian strata and Sinian Yunkai Group respectively. In this research, the authors have discovered for the first time melt inclusions and fluid-melt inclusions in ore-bearing quartz and mylonites of these two deposits, which is of great significance in solving the genetic problem of this type of gold deposits. The homogenization temperatures of melt inclusions and liquid inclusions in the Qiaogashan gold deposit are 900 ~ 1100 °C and 285 ~ 390 °C respectively. The ore-forming fluids are of Na⁺-K⁺-Ca²⁺-SO₄²⁻-HCO₃⁻-Cl⁻ system. The homogenization temperatures of melt inclusions, unmixed liquid inclusions and liquid inclusions in the Hetai gold deposit are 870 °C, 530 °C and 180 ~ 350 °C respectively. The ore-forming fluids belong to K⁺-Ca²⁺-Mg²⁺-Na⁺-SO₄²⁻-HCO₃⁻-Cl⁻ system. The daughter minerals of melt inclusions were analyzed by means of SEM. Quartz, orthoclase, wollastonite, sialicate and other five minerals were identified, which respectively formed unique mineral assemblages. This analysis has further proved the existence of melt inclusions in ore veins. Sedimentary metamorphic rocks could form sialicate melt characterized by melt to fluid features under the condition of metamorphic anatexis and severe dynamic metamorphism. The ore-forming process was related to multi-stage sialicate melt and fluid actions.