

江西香炉山矽卡岩型白钨矿矿床成因与流体特征*

熊欣^{1,2}, 徐文艺², 文春华³

(1 中国地质大学, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要 香炉山白钨矿矿床位于江西修水县城西北 35 km 处, 是一座超大型白钨矿矿床。文章通过对该矿床蚀变矿化特征的研究, 表明香炉山白钨矿矿床的矿化类型主要为矽卡岩型, 其次为蚀变岩型(云英岩化型)。根据产状和岩相学特征进一步可将矿床的矿化过程划分为 3 个阶段: ① 矽卡岩化阶段; ② 白钨矿-白云母-石英阶段; ③ 石英-硫化物阶段。流体包裹体测温结果显示, 矽卡岩化阶段均一温度为 354~518℃, 峰值为 465℃, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 6.88%~13.4%; 白钨矿-白云母-石英阶段均一温度为 225~408℃, 峰值为 340℃, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 2.41%~12.28%; 石英-硫化物阶段均一温度为 185~344℃, 峰值为 280℃, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 2.41%~11.58%。该矿床的成矿流体为典型的中-高温、中低盐度流体体系。流体中富含 F、P、H₂O 等挥发分对成矿的运移和富集起到一定的作用, 而 CO₂ 对钨的迁移作用不大。流体包裹体岩相学及测温结果揭示了流体在矽卡岩阶段经历沸腾或不混溶过程, 含 F、低盐度、成矿流体呈酸性, 有利于钨矿的沉淀, 这些是含矿流体内钨迁移与成矿的重要因素。

关键词 地球化学; 流体包裹体; 云英岩化; 矽卡岩化; 白钨矿矿床; 江西省

中图分类号: P618.67

文献标志码: A

Fluid characteristics and genesis of Xianglushan skarn scheelite deposit in Xiushui, Jiangxi Province

XIONG Xin^{1,2}, XU WenYi² and WEN ChunHua³

(1 China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China)

Abstract

Located 35 km northwest of Xiushui County in Jiangxi Province, the Xianglushan scheelite deposit is a superlarge scheelite skarn deposit. This study focused on the fine granite body and orebody by using such means as systematic petrographical study, electron microprobe analysis, microthermometry and Raman probe analysis. Combined with deposit geology, mineralization could be divided into three parallel stages: the skarn stage, the scheelite-quartz-muscovite stage and the quartz-sulphide stage. Two types of fluid inclusions, i. e., liquid-rich (I) and gas-rich (II) inclusions, were observed. The fluid inclusions of stage I are characterized by high temperatures (354~518℃) and low to medium salinity ($w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 6.88%~13.4%). The fluid inclusions of stage II exhibit medium to high temperatures (225~408℃) and low to medium salinity ($w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 2.41%~12.28%). The fluid inclusions of stage III have medium temperatures (185~344℃) and low salinity

* 本文得到国家科技支撑计划课题(编号: 2011BAB04B03)资助

第一作者简介 熊欣, 女, 1989年生, 在读博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: XiongXin_1989@163.com

收稿日期 2013-08-13; 改回日期 2015-08-04。苏杭编辑。

($w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 2.41%~11.58%)。The ore fluid system of the Xianglushan scheelite deposit is characterized by typical high temperature and low salinity. The fluids of the ore-forming stage are rich in F, P, H_2O , CH_4 without CO_2 , which must have played an important role in migrating and depositing. The petrography and temperature measurement results of fluid inclusions reveal that the fluid of the skarn stage underwent the boiling process, which provided the suitable physical and chemical environment for migration of ore fluid. In addition, fluid physical and chemical environment was changed by greisenization, which might have been the main factor for the precipitation of tungsten.

Key words: geochemistry, fluid inclusion, greisenization, skarn, scheelite deposit, Jiangxi Province

砂卡岩型白钨矿矿床是目前世界上分布最广、最重要的钨矿床类型之一(毕承思, 1987; 戴婕等, 2011), 具有重要的经济价值(戴婕等, 2011)。香炉山砂卡岩型白钨矿矿床位于江西修水县城西北 35 km 处, 北与湖北省通山县毗邻。该矿床自发现以来, 前人在矿床地质特征、地质年代学(Sm-Nd 同位素年龄为 (126.2 ± 2.6) Ma; 张家菁等, 2008)和矿床成因等方面做了较详细的工作(田邦生等, 2008; 陈波等, 2012), 但在成矿流体方面的研究相对薄弱, 目前仅有少量的爆裂温度数据(陈耿炎, 1990)。原生包裹体是指晶体形成过程中, 捕获在晶格缺陷的流体, 是反映成矿流体的性质、演化及矿床成因的重要手段(王旭东等, 2008)。本文主要通过剖析香炉山砂卡岩型白钨矿蚀变矿化特征和成矿流体演化过程, 研究和探讨成矿流体的性质、演化特征, 以期对香炉山白钨矿床成因的研究提供流体方面的依据。

1 矿区地质

香炉山白钨矿矿床位于江西西北部修水县, 属扬子古板块的江南地块东南缘, 处于九江拗陷与九岭隆起的交接地带, 是赣北九岭-鄱公山钨锡成矿带的组成部分(田邦生等, 2008; 陈波等, 2012)。

矿区出露的地层为寒武系中统杨柳岗组和寒武系上统华严寺组(图 1), 寒武系中统杨柳岗组为一套薄层-中厚层状含碳硅泥质灰岩和灰质泥岩, 是香炉山钨矿的主要赋矿地层; 上统华严寺组, 为条带状泥质灰岩, 结构致密, 具发育的条带-层纹状构造, 岩石普遍角岩化。

矿区位于香炉山 NE 向短轴背斜的 SW 倾伏端, 背斜轴部被花岗岩占据, 两翼依次出露寒武系中统和上统, 层间剥离构造发育, 控制着区内地层、岩体和矿体的形态及产状; 断裂主要有 NNE 向和 NW 向 2 组, 以前者为主。矿体主要赋存在香炉山 NE 向背斜

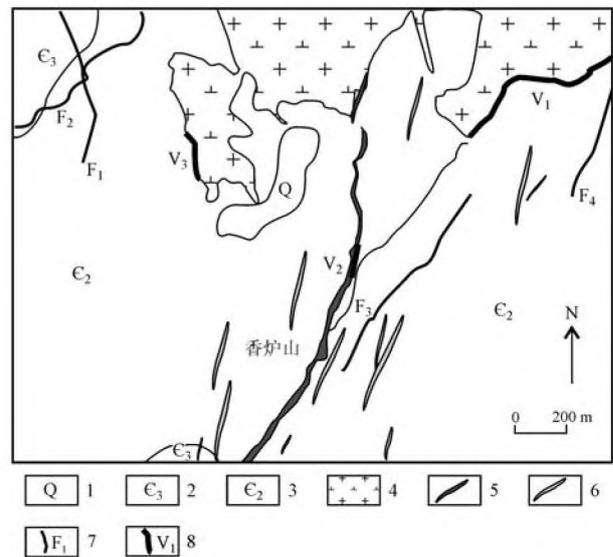


图 1 江西省香炉山钨矿区地质图(据张家菁等, 2008)

1—第四系; 2—寒武系上统华严寺组灰岩; 3—寒武系中统杨柳岗组泥质灰岩; 4—燕山晚期细粒黑云母花岗岩; 5—细晶岩; 6—辉绿岩; 7—断层; 8—钨矿脉

Fig. 1 Geological map of the Xianglushan tungsten deposit in Jiangxi Province (after Zhang et al., 2008)

1—Quaternary; 2—Upper Cambrian Huayanshan Formation limestones; 3—Middle Cambrian Yangliugang Formation limestones; 4—Late Yanshanian medium-grained biotite granites; 5—Aplite; 6—dabase dyke; 7—fault; 8—tungsten vein

核部的燕山晚期花岗岩与寒武系杨柳岗组不纯灰岩的接触带内。

矿区内发育燕山期黑云母花岗岩(K-Ar 同位素年龄为 125.9~131.1 Ma; 杨明桂等, 2004), 出露于矿区东北部, 是高湖岩株的一部分, 岩株位于香炉山背斜核部, 出露面积为 5 km²。在矿区范围内, 花岗岩体形态与背斜形态一致, 可分为边缘相和内部相 2 个相带, 二者呈过渡关系。边缘相为细粒黑云母花岗岩, 呈面型展布, 构成矿区主矿体底板, 顶部常见不规则似伟晶岩壳。细粒黑云母花岗岩为细粒结

构,局部含少量钾长石斑晶,钾长石常发生硅化,形成蠕英石,可见钾长石的残余体(图 2a)。主要矿物含量为:石英 35%~38%、钾长石 35%、斜长石 25%、黑云母 3%,普遍遭受云英岩化、白钨矿矿化,局部构成矿体。内部相为中粒黑云母二长花岗岩,

主要矿物含量为:石英 30%、钾长石 30%~35%、斜长石 30%、黑云母 5%。除此之外,矿区内还可见细晶岩脉和辉绿岩脉,主要分布在香炉山背斜南东翼。

矿区内白钨矿矿化带长度>4000 m,宽 1500 m,目前勘探已控制的矿体共 50 多个,其中产于接触

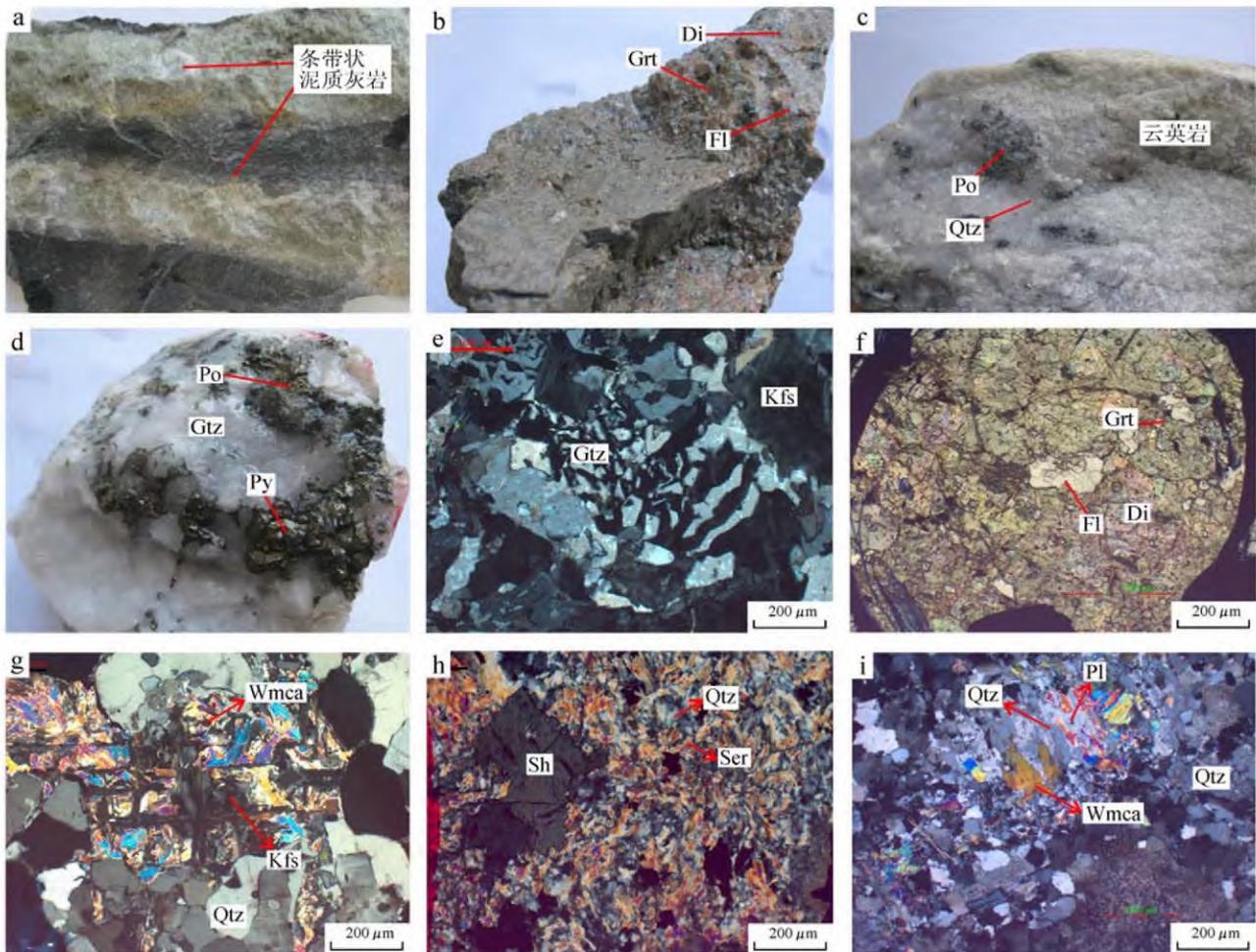


图 2 香炉山砂卡岩型白钨矿矿床手标本及镜下照片

a. 条带状泥质灰岩; b. 砂卡岩内可见大量晶型较好的石榴子石,还有少量透辉石残余,及后期形成的萤石; c. 黑云母花岗岩发生强烈的云英岩化,后被石英-磁黄铁矿等硫化物脉充填; d. 石英-硫化物矿石,硫化物主要为黄铁矿和磁黄铁矿(+); e. 钾长石发生硅化形成蠕英石; f. 砂卡岩中透辉石残余和少量石榴子石,后期萤石充填(+); g. 花岗岩内早期发生钾长石化,后受到云英岩化的蚀变交代(+); h. 白钨矿呈浸染状分布,并与云英岩化所形成的白云母和石英共生(-); i. 花岗岩内斜长石发生强烈的云英岩化

Grt—石榴子石; Di—透辉石; Fl—萤石; Po—磁黄铁矿; Qtz—石英; Py—黄铁矿; Kfs—钾长石; Wmca—白云母; Sh—白钨矿; Ser—绢云母; Pl—斜长石

Fig. 2 Hand specimen and microscope photos of the Xianglushan tungsten deposit

a. Stripe argillaceous limestone; b. Within skarn, a large amount of garnet and a small amount of diopside residual and later fluorite can be seen; c. Heavily gresenitized biotite granites, cut by quartz-pyrrhotite veins(+); d. Quartz-sulfide and the sulfide mainly consists of pyrite and pyrrhotite(+); e. Feldspar altered by myrmekite; f. In skarn, diopside residual and a small amount of garnet and fluorite at the quartz-sulfide stage(+); g. Granite was altered by K-feldspar and then greisenization occurred overlying the K-feldspar(+); h. Scheelite is in disseminated distribution, and intergrows with greisenized muscovite and quartz(-); i. In granites, plagioclase was greisenized(+)

Grt—Garnet; Di—Diopside; Fl—Fluorite; Po—Pyrrhotite; Qtz—Quartz; Py—Pyrite; Kfs—K-feldspar; Wmca—Muscovite; Sh—Scheelite; Ser—Sericite; Pl—Plagioclase

带的5个,内接触带9个,外接触带36个(图3,田邦生等,2008)。编号为1W的矿体为主矿体,呈似层状产于接触带内,矿头标高358~658 m,埋深40~300 m,矿石为矽卡岩型白钨矿矿石,局部夹少量花岗岩型白钨矿矿石,WO₃资源储量达20多万t;其次为产于外接触带4W、矿体和内接触带5W矿体,WO₃储量均大于5000 t(田邦生等,2008)。

2 蚀变与矿化特征

2.1 蚀变特征

矿区内蚀变广泛发育,目前所识别出的蚀变类型有矽卡岩化、角岩化、硅化、云英岩化、绿泥石化、方解石化、萤石化、硅化和高岭土化等,其中与钨矿化关系密切的有云英岩化和矽卡岩化。蚀变在空间上具有一定的分带性:岩体与硅泥质灰岩、灰质泥岩的内接触带出现了较为普遍的云英岩化,且越近岩体接触带越强;外接触带主要发生矽卡岩化,形成似层状覆于岩体顶面宽50~200 m的矽卡岩带(田邦生等,2008);矽卡岩带向外围和顶部逐步减弱,逐渐过渡为角岩化带。

角岩化:主要发育于矽卡岩带的外围和顶部条带状泥质灰岩,形成了透闪石、阳起石、透辉石、磁铁

矿等热变质矿物,基本保留了原岩特征,具变余结构(图2b)。

矽卡岩化:主要发育于黑云母花岗岩岩体与硅泥质灰岩、灰质泥岩接触带,主要形成透辉石、石榴子石、符山石、绿帘石、阳起石、透闪石等典型的钙矽卡岩矿物,岩石具细粒变晶结构,条纹条带状构造。石榴子石呈自形或半自形集合体,粒径0.1~5 mm,按矿物成分的不同可分为钙铁榴石和钙铝榴石2种(表1)。通常可见透辉石交代更早形成的石榴子石,有时还与符山石共生。电子探针分析表明,主要为透辉石端员,其次为钙铁辉石端员,由一套十分典型的富钙矽卡岩矿物组成(表1)。

云英岩化:主要发育于与硅泥质灰岩、灰质泥岩接触的黑云母花岗岩岩体内,主要表现为硅铝矿物(长石、石英、黑云母等)受到蚀变,形成白云母和石英(图2d),局部交代残余的钾长石和斜长石,及后期叠加的钠长石、钾长石和碳酸盐矿物,在手标本及镜下常可观察到云英岩化形成的白云母-石英与钾长石共生(图2e)。

萤石化:表现为形成于晚期的萤石充填交代早期的石榴子石等,同时有铜铁硫化物如黄铁矿等及少量白钨矿发生沉淀,叠加于早阶段形成的白钨矿化之上。

表1 香炉山钨矿床矽卡岩主要矿物石榴子石和透辉石的电子探针分析结果(w(B)/%)
Table 1 Electron microprobe analyses of garnet and diopside from Xianglushan tungsten deposit (w(B)/%)

组分	xls7-1-3	xls7-1-4	xls8-1-1	xls8-1-3	xls8-2-1	xls8-1-2	xls8-2	xls9-1	xls9-3	xls11a-12
SiO ₂	37.55	37.05	37.87	36.30	37.23	55.15	54.85	52.08	54.06	49.54
TiO ₂	0.20	1.18	0.00	1.63	0.04	0.00	0.06	0.05	0.18	0.04
Al ₂ O ₃	15.50	18.42	17.64	16.52	6.31	0.13	0.07	0.58	0.15	0.24
Cr ₂ O ₃	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.00	0.02	0.03	0.02	0.02
FeO	10.07	5.38	3.07	3.86	20.85	4.35	5.00	17.32	4.80	24.74
MnO	1.69	2.23	0.30	0.28	0.47	0.66	0.35	1.61	0.83	2.58
MgO	0.00	0.01	2.49	1.69	0.22	15.68	15.25	6.77	14.76	0.59
CaO	33.49	33.78	35.68	35.12	33.79	25.02	24.27	23.53	24.57	22.20
总和	99.53	98.08	97.07	95.42	98.91	100.99	99.87	101.90	99.36	99.96
Gr	64.74	78.14	81.43	81.09	27.69	—	—	—	—	—
Ad	28.58	15.55	9.12	11.99	69.88	—	—	—	—	—
Alm+Spe+Pyr	6.59	6.22	9.41	6.83	2.38	—	—	—	—	—
Wo	—	—	—	—	—	49.28	48.85	49.15	49.56	49.75
En	—	—	—	—	—	42.98	42.69	19.69	41.43	1.85
Fs	—	—	—	—	—	7.73	8.46	30.97	8.92	48.11
Ac	—	—	—	—	—	0.00	0.00	0.19	0.09	0.29
	钙铁-钙 铝榴石	钙铁-钙 铝榴石	钙铁-钙 铝榴石	钙铁-钙 铝榴石	钙铁-钙 铝榴石	透辉石	透辉石	钙铁辉石	透辉石	钙铁辉石

注:在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室分析,仪器型号:日本产JXA-8230。Gr—钙铝榴石,Ad—钙铁榴石,Alm—铁铝榴石,Spe—锰铝榴石,Pyr—镁铝榴石,Wo—硅辉石,En—镁斜方辉石,Fs—铁斜方辉石,Ac—霓石。

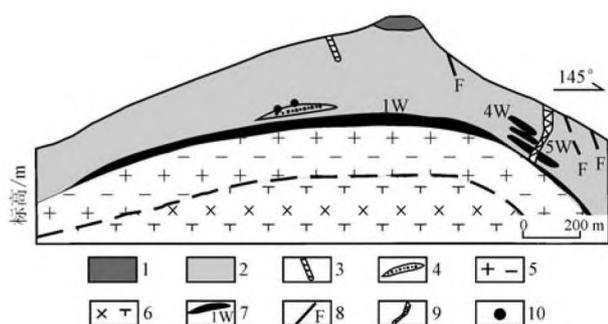


图3 香炉山矿床12线剖面图(据田邦生等,2008 修改)
1—上寒武统华严寺组灰岩;2—中寒武统杨柳岗组泥质灰岩;
3—辉绿岩脉;4—角砾岩;5—燕山晚期细粒黑云母花岗岩;6—
燕山晚期中粒黑云母花岗岩;7—钨矿体;8—断层;9—细晶岩;
10—采样位置

Fig. 3 Cross section along No. 12 exploration line in the
Xianglushan tungsten deposit(modified after Tian et al.,
2008)

1—Upper Cambrian Huayanshan Formation limestones; 2—Middle
Cambrian Yangliugang Formation limestones; 3—Diabase dyke; 4—
Breccia; 5—Late Yanshanian fine-grained biotite granite; 6—Late
Yanshanian medium-grained biotite granites; 7—Tungsten orebody;
8—Fault; 9—Aplite; 10—Sampling site

2.2 矿化特征

白钨矿主要以2种方式赋存:第一种呈他形粒状与白云母共生,粒径多在0.05~0.2 mm(图2f);第二种主要表现为白钨矿等金属矿物交代溶蚀透辉石等脉石矿物,早期晶出的金属矿物又被晚晶出的金属矿物溶蚀交代,可见白钨矿被磁黄铁矿、黄铁矿等矿物交代,而磁黄铁矿和黄铁矿又被晚期黄铜矿、方铅矿和闪锌矿交代。矿石矿物除白钨矿外,还有黑钨矿、磁黄铁矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿和辉钼矿等。脉石矿物主要有透辉石、石榴子石、透闪石、符山石、石英、长石和方解石。

2.3 蚀变矿化阶段

根据矿物组合、矿物特征以及脉体的产状和穿插关系,将蚀变矿化分为3个阶段。

第一阶段:矽卡岩化阶段,主要表现为接触带内发生强烈的矽卡岩化,形成透辉石、石榴子石等矽卡岩矿物(图2g)。

第二阶段:白钨矿-白云母-石英阶段,在接触带内发生普遍的云英岩化(图2h),在靠近岩体的内接触带白钨矿常呈他形粒状与白云母共生,在靠近围岩的外接触带白钨矿等金属矿物普遍交代溶蚀透辉石等脉石矿物。

第三阶段:石英-硫化物阶段,主要表现为早期矽卡岩类矿物如符山石、透辉石被大量方解石、萤石、硅化充填交代(图2i),早晶出的金属矿物白钨矿、磁铁矿等被晚晶出的金属矿物溶蚀交代,形成的金属矿物主要有磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿等,除此之外,还发生绿泥石化、高岭土化等低温蚀变。

3 流体包裹体

3.1 样品采样及其实验方法

本次采样位置在1W1号(标高650 m)、1W5号(标高623.4 m)平硐内,测试样品包括矿体及围岩,涵盖了各个成矿阶段。流体包裹体显微测温在中国地质科学院矿产资源研究所实验室完成,测试仪器为Linkam THMSG 600型显微冷热台,温度范围-196~+600℃,≤30℃时测试精度为±0.1℃,>30℃时测试精度为±1℃。本文主要针对那些产出较为孤立或随机分布的包裹体进行测温,测试结果列于表2。

3.2 流体包裹体类型

矿区内流体包裹体比较发育,按常温下包裹体中各相态成分、比例、组合关系及均一时相态,将所观察到的流体包裹体分为富液相(I型)、富气相(II型)2种类型,按照不同的寄主矿物,可分为石英、透辉石、萤石包裹体,详细描述如下。

透辉石内包裹体:主要发育于第一阶段,透辉石透明度较差,可见少量包裹体。原生包裹体以不规则为主,其次椭圆形(图4a),包裹体常呈孤立散乱分布,无明显的先后穿插关系。透辉石内存在I型、II型包裹体,I型包裹体,大小5~10 μm,气相分数25%~40%;II型包裹体,大小5~15 μm,气相分数50%~80%。在第一阶段内常可见I型包裹体与II型包裹体紧密共生并在相近温度下均一化,为非均匀流体体系以不同的比列捕获所出现的相,指示流体在第一阶段中可能发生过沸腾或相分离。

石英内包裹体:主要发育于第二、三阶段。第二阶段的石英晶体较大,最大可达3 mm,多被溶蚀呈椭圆形或港湾状,部分碎裂,部分见增生环带,透明度较差,常被后期裂隙切断,原生包裹体多且小,形态主要为锥柱状、椭圆形(图4b),目前只观察到富液相包裹体,大小约3~8 μm,气相分数5%~25%。第三阶段的石英透明度较好,多呈自形或半自形,此阶段石英内包裹体发育,原生包裹体个体较大,目前

表 2 香炉山砂卡岩型白钨矿矿床不同阶段流体包裹体显微测温结果

Table 2 Microthermometric results in different stages from the Xianglushan scheelite deposit

阶段	主矿物	包裹体类型	个数	冰点/℃	均一温度/℃	w(NaCl _{eq})/%	密度/(g/cm ³)
第一阶段(砂卡岩阶段)							
	透辉石	I	28	-8.4~-3.2	354~518	6.88~13.40	—
	透辉石	II	4	-8.9~-8.0	459~491	11.70~12.73	—
第二阶段(白钨矿-白云母-石英阶段)							
	石英	I	47	-7.4~-0.3	285~408	2.41~12.28	0.71~2.05
	白钨矿*	—	1	—	225	—	—
	石英*	—	3	—	260~330	—	—
第三阶段(石英-硫化物阶段)							
	石英	I	54	-3.8~-0.3	186~344	2.41~7.73	0.87~2.16
	萤石	I	11	-6.8~-3.7	232~344	7.59~11.58	—
	磁黄铁矿*	—	—	—	185	—	—

注：“—”为无数据；“*”为爆裂温度，引自陈耿炎，1990。

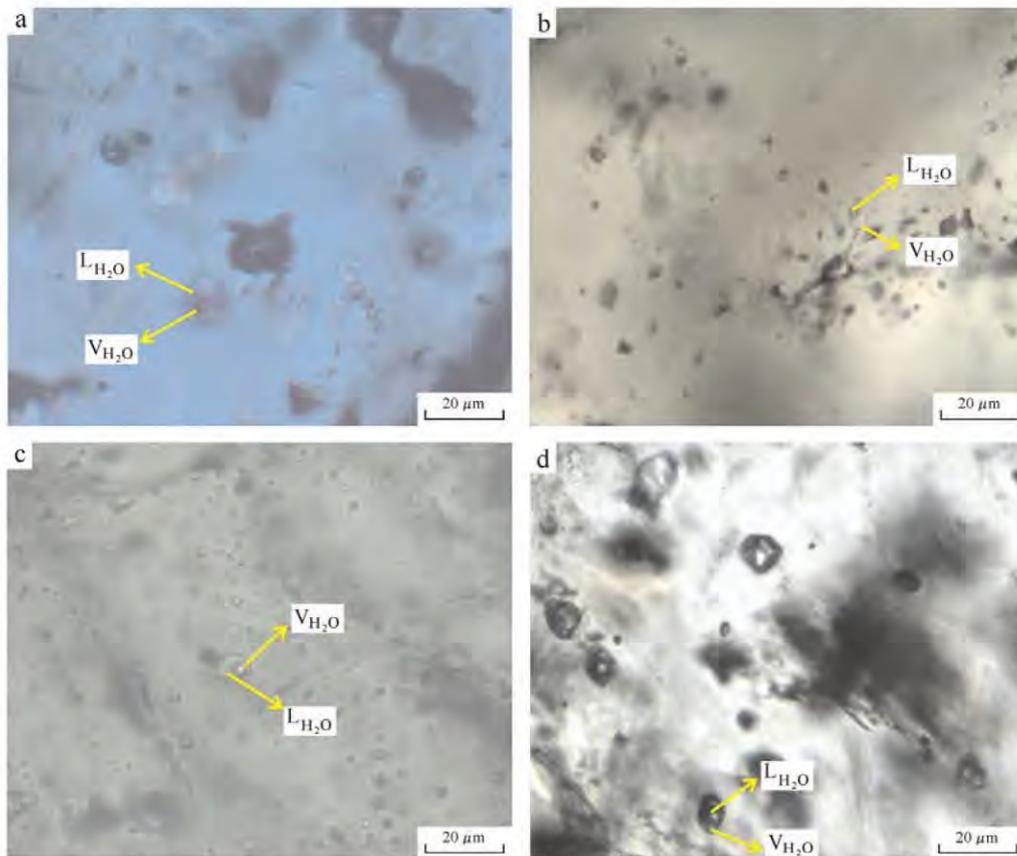


图 4 香炉山白钨矿各阶段流体包裹体照片(透射光)

a. 第一阶段透辉石内流体包裹体；b. 第二阶段石英内流体包裹体；c. 第三阶段石英内流体包裹体；d. 第三阶段萤石内流体包裹体

Fig. 4 Photographs of fluid inclusions from the Xianglushan scheelite deposit (transmitted light)

a. Fluid inclusions of diopside at the first stage; b. Fluid inclusions of quartz at the second stage; c. Fluid inclusions in quartz at the third stage; d. Fluid inclusions within fluorite at the third stage

只观察到富液相包裹体，一般为 5~14 μm，少数达到 20 μm，气相分数 5%~40%。原生包裹体主要呈不规则和近椭圆形，少数近圆形，在空间上表现为成

群散乱分布，无明显的先后穿插关系。而次生包裹体主要呈线状分布，一般在 4 μm 以下(图 4c)。

萤石内包裹体：主要发育于第三阶段，萤石在空

间上常与透辉石伴生,为石英硫化物阶段的产物。萤石内包裹体较少,主要呈椭圆形零散分布,主要为I型包裹体,气相分数10%~30%(图4d)。

3.3 包裹体的均一温度、盐度及密度

在对各类包裹体特征进行详细观察记录的基础上,择其典型者进行显微测温分析。对I型、II型包裹体测定冰点温度和均一温度,结果见表2和图5。盐度值根据NaCl-H₂O型包裹体的冰点温度在冷冻

温度-盐度数值表中查得(Bodnar et al., 1985),密度值利用经验公式求得(刘斌等,1999)。

第一阶段:综合该阶段透辉石中包裹体测温结果(表2,图5a,b),该阶段流体包裹体均一温度范围为354~518℃,平均值为443.37℃; $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为6.88%~13.40%,峰值为12.28~13.18%,平均值为11.65%。其中透辉石I型包裹体均一温度范围为354~518℃; $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为6.88%~13.40%;透辉

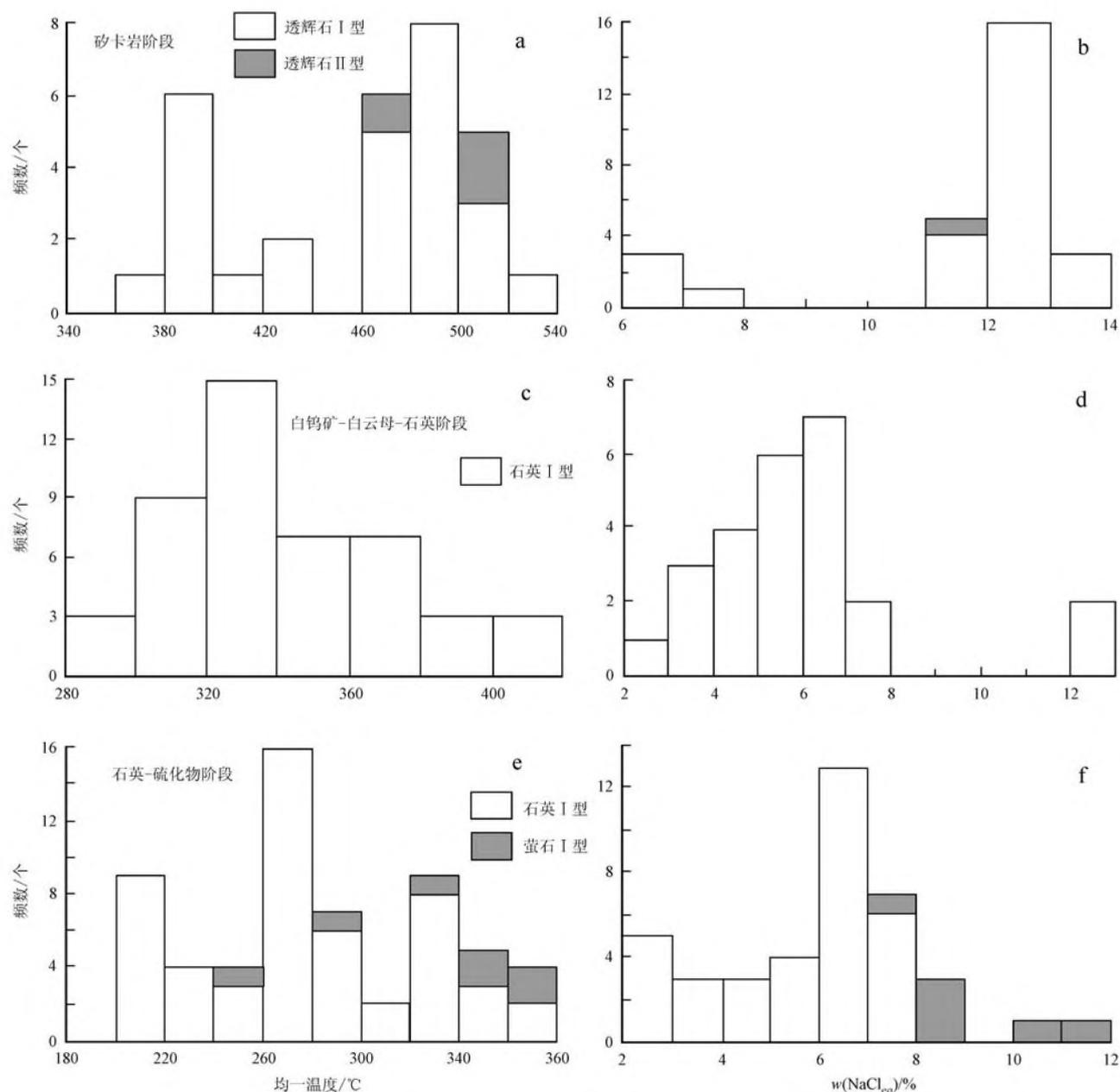


图5 香炉山矿床流体包裹体均一温度(a, c, e)、盐度分布(b, d, f)直方图

Fig. 5 Histogram of homogenization temperatures(a, c, e) and salinities(b, d, f) of fluid inclusions of the Xianglushan scheelite deposit

石Ⅱ型包裹体均一温度范围为459~491℃; $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为11.70%~12.73%。透辉石Ⅰ型包裹体、Ⅱ型包裹体常表现为紧密共生并在相近温度下均一化,指示流体在第一阶段中可能发生过沸腾。

第二阶段:综合该阶段石英和白钨矿及前人包裹体测温结果(表2,图5c、d),该阶段流体包裹体均一温度范围为225~408℃,平均值为340.02℃; $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为2.41%~12.28%,平均值为5.94%;密度范围为0.71~2.05 g/cm³,平均值为1.14 g/cm³。其中石英Ⅰ型包裹体均一温度范围为285~408℃; $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为2.41%~12.28%,密度范围为0.71~2.05 g/cm³;前人测白钨矿爆裂温度为225℃,成矿阶段石英爆裂温度在260~330℃(陈耿炎,1990),与本次测温结果范围相符。

第三阶段:综合该阶段石英、萤石及前人包裹体测温结果(表2,图5e、f),该阶段流体包裹体均一温度范围为185~344℃,平均值为262.40℃; $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为2.41%~11.58%平均值为6.02%;密度范围0.87~2.16 g/cm³,平均值为1.66 g/cm³。其中石英Ⅰ型包裹体均一温度范围为186~344℃; $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为2.41%~7.73%,密度范围为0.87~2.16 g/cm³;萤石Ⅰ型包裹体均一温度范围为232~344℃; $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为7.59%~11.58%;前人测磁黄铁矿爆裂温度为185℃(陈耿炎,1990),与本次测温结果范围相符。

3.4 流体包裹体组成拉曼光谱分析

为了解流体包裹体的成分特征,在中国地质科学院矿产资源研究所矿物岩石实验室进行激光拉曼光谱分析,分析仪器为英国Renishaw公司产System 2000型显微共焦激光拉曼光谱仪,激光波长514.53 nm,激光功率20 mW,最小激光束斑直径1 μm,扫描范围100~4500 cm⁻¹,分辨率1~2 cm⁻¹,分析样品为双面抛光薄片。对不同期次的包裹体均进行了详细的拉曼探针研究,拉曼探针分析结果如下(图6)。

通过对单个包裹体进行系统的拉曼原位分析,发现矿区流体包裹体成分较为简单,气相普遍含有CH₄。液相成分主要为水。第一阶段的流体包裹体气相成分以H₂O为主,液相以H₂O为主;第二阶段流体包裹体气相成分以H₂O和CH₄为主,液相以H₂O为主;第三阶段包裹体CH₄、H₂O含量达到最高,液相以H₂O为主。

4 讨论

4.1 成矿流体特征

第一阶段:脉矽卡岩阶段内包裹体类型有Ⅰ型、Ⅱ型,气相成分主要为H₂O,液相成分主要为H₂O,流体体系为NaCl-H₂O体系。测温结果显示该阶段流体包裹体均一温度范围为354~518℃, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为6.88%~13.40%,流体包裹体岩相学及测温结果揭示流体在第一阶段中发生过沸腾。该阶段流体以中-高温、中低盐度范围、流体组成相对简单为特征。

第二阶段脉:石英中包裹体类型有Ⅰ型,气相成分主要为H₂O和CH₄,液相成分为H₂O,流体体系为NaCl-H₂O体系为主。测温结果显示该阶段流体包裹体均一温度范围为225~408℃, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为2.41%~12.28%,该阶段流体以中温、盐度范围低、流体组成相对简单为特征。

第三阶段脉:石英中包裹体类型有Ⅰ型,气相成分主要为H₂O和CH₄,液相成分为H₂O,流体体系主体上属于NaCl-H₂O体系。测温结果显示该阶段流体包裹体均一温度范围为185~344℃, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为2.41%~11.58%,该阶段流体以低温,低盐度、流体组成相对简单为特征。

香炉山白钨矿的流体包裹体主要为富液相包裹体、少量富气相包裹体,这与其他地区同类型钨矿床相似(卢焕章等,1977)。随着成矿作用的进行,包裹体类型由富气相、富液相逐渐转变为富液相包裹体,成分逐渐变简单,均一温度经历了从高温—中温—低温的演化过程,盐度总体变化不明显,反映出成矿作用的延续性。因此,判断香炉山矽卡岩型白钨矿矿床属中-高温、中低盐度、低密度热液矿床。

4.2 成矿流体演化

在成矿早期矽卡岩化阶段,矽卡岩矿物透辉石的均一温度为412~518℃,主要集中在460~500℃之间,部分包裹体大于600℃(仪器温度上限),因此,矽卡岩化从600℃甚至更高开始,一直持续到大致400℃。一系列镜下、电子探针工作,揭示矽卡岩矿物主要为钙铝石榴子石和钙铁辉石,这2种矿物在碱性条件下不易合成,因此,推测在矽卡岩矿床早期矽卡岩阶段,成矿介质可能呈中酸性。矽卡岩内透辉石流体包裹体岩相学特征及其测温结果显示在

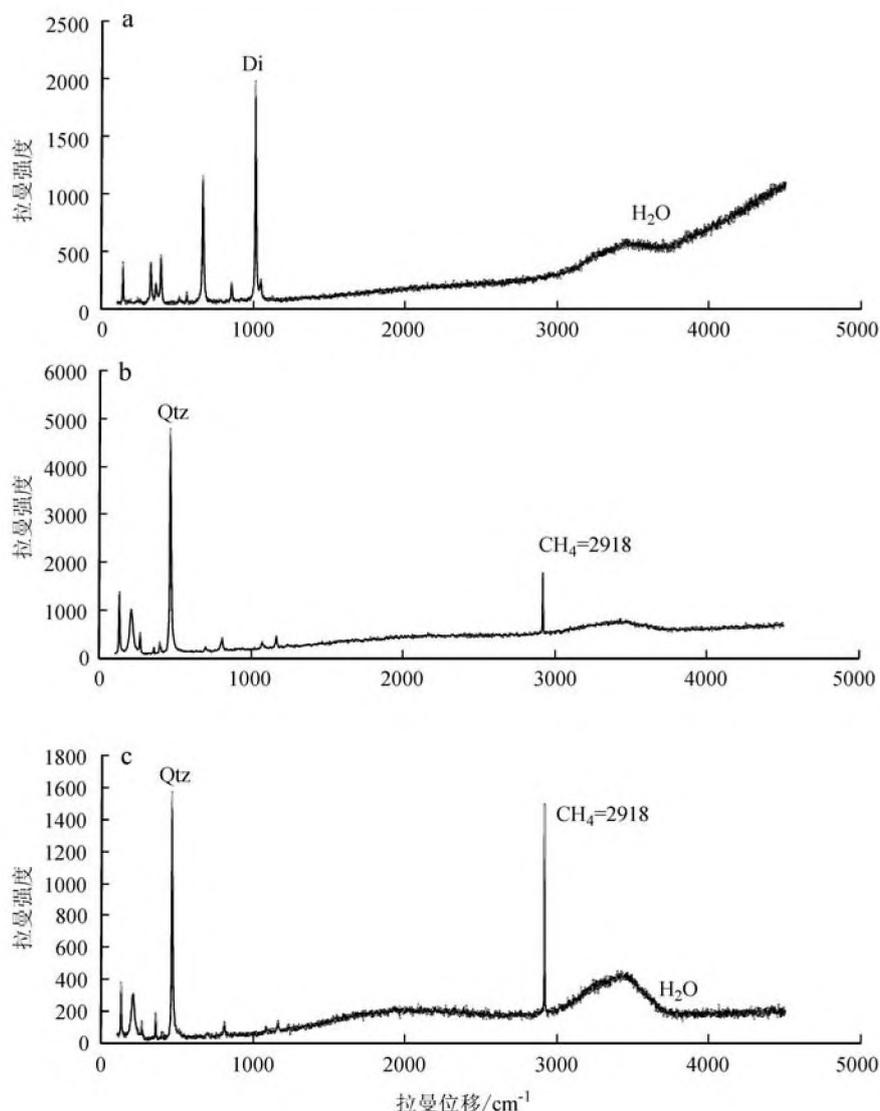


图6 香炉山白钨矿矿床流体包裹体激光拉曼图谱

a. 第一阶段透辉石(Di)流体包裹体; b. 第二阶段石英(Qtz)流体包裹体; c. 第三阶段石英(Qtz)流体包裹体

Fig. 6 Laser Raman spectrum of fluid inclusions from the Xianglushan scheelite orefield

a. Diopside (Di) of the first stage (Xls-8); b. Quartz (Qtz) of the second stage (Xls-2); c. Quartz (Qtz) of the third stage (Xls-5)

流体演化早期经历过沸腾或不混溶过程。在流体演化早期, 沸腾有效地促成了高温、高盐度流体的形成, 而高温、高盐度流体具有很强的金属元素携带能力, 从而使成矿元素有效地从岩浆中分离出来。

成矿期白钨矿-白云母-石英阶段形成温度大致在 254~408℃, 岩浆期后的含矿热液大量聚集于接触带, 与内外接触带岩石发生化学反应, 形成含 F、低盐度、酸性的成矿流体 (Burt, 1981; Eadington, 1983; Taylor et al., 1988; 于阿朋等, 2010) 与硅铝矿物(长石、石英、黑云母等) 反应, 出现了较为普遍的云英岩化, 结合生成云母类矿物(白云母、锂云母、锂

铷云母等), 此时白钨矿呈他形粒状与云母类矿物共生; 与此同时, 含矿溶液交代溶蚀含钙矿物(方解石、透辉石等), 生成钨酸钙矿(白钨矿)。白钨矿的成矿主要发生在云英岩化阶段, 云英岩化一方面在氟-钨形成络合物迁移过程中, 导致 F 进入了白云母矿物晶格, 从而为钨元素提供了沉淀剂 Fe、Mn; 另一方面是云英岩化改变了流体的物理化学环境, 结果导致 pH 值升高(含矿溶液呈弱碱性)、氧逸度降低和 F⁻ 等络合物增多, 进而促使钨富集、沉淀 (Jackson et al., 1985a; 1985b; Halter et al., 1996; 于阿朋等, 2010)。

包裹体拉曼成分分析揭示成矿期流体包裹体富

CH₄、H₂O,综合镜下判断大量磷灰石、萤石矿物的存在,判断成矿流体富F、P、H₂O、CH₄挥发分,早期透辉石内拉曼数据受到强烈的荧光干扰也间接说明成矿流体中F含量较高。因此,F、P、H₂O等为成矿流体中的挥发分,对成矿的运移和富集起到一定的作用。矿区流体包裹体内并未发现CO₂,关于成矿元素钨在热液中的运移,目前有2种观点:一种观点认为CO₂对于钨的迁移沉淀富集有着极为密切的内在联系;另一种观点则相反,认为CO₂对于钨的迁移没有多大作用(Noronha et al., 1992; Rios et al., 2003; 宋生琼等, 2011)。华南白钨矿流体包裹体研究表明,大部分矽卡岩型白钨矿矿床流体包裹体内不含CO₂或者含很少量的CO₂(卢焕章等, 1977)。本区流体包裹体并未发现CO₂。

在晚期石英-硫化物阶段185~344℃,白钨矿大量沉淀后,含矿热液演化为相对富硫且呈弱酸性(陈耿炎, 1990; 田邦生等, 2008; 陈波等, 2012),本阶段流体包裹体测温结果部分与云英岩化内此生包裹体的温度一致,表明流体活动还在继续,还在沉淀少量的白钨矿。流体内富含硫化物及少量钨元素发生沉淀,叠加于早阶段形成的白钨矿化之上(陈耿炎, 1990; 田邦生等, 2008; 陈波等, 2012),主要表现为早晶出的金属矿物白钨矿、磁铁矿等又被晚晶出的金属矿物溶蚀交代,形成磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿等。

矽卡岩内透辉石流体包裹体岩相学特征及其测温结果显示在流体演化早期经历过沸腾或不混溶过程,含F、低盐度、酸性有利于钨矿的沉淀。

5 结 论

(1) 香炉山矽卡岩型白钨矿矿床属高-中温、中低盐度、低密度热液矿床。

(2) 香炉山矽卡岩型白钨矿矿床可划分为矽卡岩化、白钨矿-白云母-石英、石英-硫化物3个阶段,流体包裹体包括富液相(I型)、富气相(II型)2种类型。

(3) 流体包裹体岩相学及测温结果揭示流体在矽卡岩阶段经历沸腾或不混溶过程,含F、低盐度、酸性有利于钨矿的沉淀,这些是含矿流体中钨迁移与成矿的重要因素。

(4) F、P、H₂O等为成矿流体中的挥发分,对成矿的运移和富集起到一定的作用。

References

- Bi C S. 1987. Basic geological characteristics of skarn-type scheelite deposit in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 49-64 (in Chinese with English abstract).
- Bodnar R J, Reynolds T J and Kuehn C A. 1985. Fluid inclusion systematics in epithermal systems[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2: 73-97.
- Burt D M. 1981. Acidity-salinity diagrams: Application to greisen and porphyry deposits[J]. *Econ. Geol.*, 76(4): 832-843.
- Chen B and Zhou X X. 2012. Ore-controlling factors and a metallogenic model for the Xianglushan tungsten-ore field in northern Jiangxi Province[J]. *Geology and Prospecting*, 48(3): 562-569 (in Chinese with English abstract).
- Chen G Y. 1990. Geology and genesis of the Xianglushan concealed scheelite deposit[J]. *Geology and Prospecting*, 26(6): 15-20 (in Chinese with English abstract).
- Dai J, Zhang L K, Pan X D, Shi H Z, Chen M H, Wang P, Zhang B H, Zhang Q, Jin B and Ren J. 2011. Mineralogical characteristics and genesis discussion of skarn in Nanyangtian scheelite deposit of southeastern Yunnan[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 30(3): 269-275 (in Chinese with English abstract).
- Eadington P J. 1983. A fluid inclusion investigation of ore formation in a tin-mineralized granite, New England, New South Wales[J]. *Econ. Geol.*, 78(6): 1204-1221.
- Halter W E, Williams-Jones A E and Kontak D J. 1996. The role of greisenization in cassiterite precipitation at the east kemptonville tin deposit, Nova Scotia [J]. *Econ. Geol.*, 91: 368-385.
- Jackson K J and Helgeson H C. 1985a. Chemical and thermodynamic constraints on the hydrothermal transport and deposition of tin: I. Calculation of the solubility of cassiterite at high pressures and temperatures[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(1): 1-22.
- Jackson K J and Helgeson H C. 1985b. Chemical and thermodynamic constraints on the hydrothermal transport and deposition of tin: II. Interpretation of phase relations in the southeast Asian tin belt [J]. *Econ. Geol.*, 80(5): 1365-1378.
- Liu B and Shen K. 1999. Thermodynamics of fluid inclusions. Beijing: Geological Publishing House. 1-290 (in Chinese).
- Lu H Z, Shi J X, Yu C M and Xu S J. 1977. A study on the characteristic and temperatures of formation of fluid inclusions from various types

- of tungsten deposits in the Nanling region[J]. *Geochimica*, (3): 179-193 (in Chinese with English abstract).
- Noronha F, Doria A, Dubessy J and Charoy B. 1992. Characterization and timing of the different types of fluids present in the barren and ore-veins of the W-Sn deposit of Panasqueira, central Portugal[J]. *Mineral Deposits*, 27(1): 72-79.
- Rios F J, Villas R N and Fuzikawa K. 2003. Fluid evolution in the Pedra Preta wolframite ore deposit, paleoproterozoic musa granite, eastern Amazon Craton, Brazil[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(7): 787-802.
- Song S Q, Hu R Z, Bi X W, Wei W F and Shi S H. 2011. Fluid inclusion geochemistry of the Taoxikeng tungsten deposit in southern Jiangxi Province, China[J]. *Geochimica*, 40(3): 237-248 (in Chinese with English abstract).
- Taylor R G and Pollard P J. 1988. Pervasive hydrothermal alteration in tin-bearing granites and implications for the evolution of ore-bearing magmatic fluids[J]. *Canadian Institute of Mining and Metallurgy Special Volume*, 39: 86-95.
- Tian B S and Yuan B Y. 2008. Geological characteristics and prospecting criteria of Xianglushan tungsten deposit, northwestern Jiangxi Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(1): 114-119 (in Chinese with English abstract).
- Wang X D, Ni P, Jiang S Y, Huang J B and Sun L Q. 2008. Fluid inclusion study on the Piaotang tungsten deposit, southern Jiangxi Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(09): 2163-2170 (in Chinese with English abstract).
- Yang M G, Wang F N, Zeng Y, Lai X P, Huang S B and Zhou H. 2004. *Geology and mineralization in north of Jiangxi Province*[M]. Beijing: China Land Press. 1-192 (in Chinese).
- Yu A P, Wang R C, Zhu J C, Xie L, Zhang W L and Che X D. 2010. Mineralogical study on greisenization zoning and tin mineralization in Huashan Granite, Guangxi, South China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 16(3): 281-293 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J J, Mei Y P, Wang D H and Li H Q. 2008. Isochronology study on the Xianglushan scheelite deposit in north Jiangxi Province and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 927-931 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 毕承思. 1987. 中国矽卡岩型白钨矿矿床成矿基本地质特征[J]. *中国地质科学院院报*, 49-64.
- 陈波, 周贤旭. 2012. 赣北香炉山钨矿田矿床控制因素及成矿模式[J]. *地质与勘探*, 48(3): 562-569.
- 陈耿炎. 1990. 香炉山隐伏白钨矿矿床地质特征及成因探讨[J]. *地质与勘探*, 26(6): 15-20.
- 戴婕, 张林奎, 潘晓东, 石洪召, 陈敏华, 王鹏, 张斌辉, 张茜, 金斌, 任静. 2011. 滇东南南秧田白钨矿矿床矽卡岩矿物学特征及成因探讨[J]. *岩矿测试*, 30(3): 269-275.
- 刘斌, 沈昆. 1999. *流体包裹体热力学*[M]. 北京: 地质出版社. 1-290.
- 卢焕章, 施继锡, 喻茨玫, 许生蛟. 1977. 南岭地区各种类型钨矿床的气液包裹体特征和形成温度的研究[J]. *地球化学*, (3): 179-193.
- 宋生琼, 胡瑞忠, 毕献武, 魏文凤, 石少华. 2011. 赣南淘锡坑钨矿床流体包裹体地球化学研究[J]. *地球化学*, 40(3): 237-248.
- 田邦生, 袁步云. 2008. 赣西北香炉山钨矿床地质特征与找矿标志[J]. *高校地质学报*, 14(1): 114-119.
- 王旭东, 倪培, 蒋少涌, 黄建宝, 孙立强. 2008. 赣南漂塘钨矿流体包裹体研究[J]. *岩石学报*, 24(09): 2163-2170.
- 杨明桂, 王发宁, 曾勇, 赖新平, 黄水保, 周辉. 2004. *江西北部金属成矿地质*[M]. 北京: 中国大地出版社. 1-192.
- 于阿朋, 王汝成, 朱金初, 谢磊, 张文兰, 车旭东. 2010. 广西花山花岗岩云英岩化分带与锡成矿过程的矿物学研究[J]. *高校地质学报*, 16(3): 281-293.
- 张家菁, 梅玉萍, 王登红, 李华芹. 2008. 赣北香炉山白钨矿床的同位素年代学研究及其地质意义[J]. *地质学报*, 82(7): 927-931.