海南屯昌地区高通岭钼矿床的地质、地球化学特征及成矿时代

廖香俊[1,2], 王平安[3], 覃海灿[4], 路西坤[4], 董法先[5], 刘晓春[5], 舒 斌[3]
LIAO Xiang-jun[1,2], WANG Ping-an[3], QIN Hai-can[4], LU Xi-kun[4],
DONG Fa-xian[5], LIU Xiao-chun[5], SHU Bin[3]

1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2. 海南省地质矿产勘查开发局, 海南 海口 570206;
3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 4. 海南省地质调查院, 海南 海口 570206;
5. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081
1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;
2. Hainan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Haikou 570206, Hainan, China;
3. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China;
4. Hainan Geological Survey, Haikou 570206, Hainan, China;
5. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

摘要:高通岭钼矿床位于华南板块南部的华南褶皱系五指山褶皱带内, 共查明平行脉状矿体9个、矿化体5个。矿石分石英脉型和钾长花岗岩型2种, 矿石中含辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿及石英、钾长石、黑云母、绢云母、绿泥石等。高通岭花岗岩体的Mo含量比其克拉克值高4倍, 沿岩体构造裂隙发育钾长石化、黄铁矿化、硅化、绢云母化、绿泥石化等蚀变和钼矿化。成矿流体成分为K^+-Na^+-Cl^--F^--SO_4^{2-}型; S、C、H、O同位素组成反映成矿物质以岩浆源为主, 流体为岩浆水与大气降水混合来源。辉钼矿Re-Os等时线年龄为98.4 Ma±2.5 Ma, 与高通岭花岗岩体侵位的时代一致。该矿床为与燕山晚期岩浆活动有关的热液石英-硫化物脉型钼矿床。

关键词:海南屯昌地区; 钼矿床; 地质和地球化学特征; 成矿时代
中图分类号: P618.65 **文献标志码**: A **文章编号**: 1671-2552(2008)04-0560-11

Liao X J, Wang P A, Qin H C, Lu X K, Dong F X, Liu X C, Shu B. Geology, geochemistry and ore-forming age of the Gaotongling molybdenum deposit, Tunchang area, Hainan, China. Geological Bulletin of China, 2008, 27(4):560-570

Abstract: The Gaotongling molybdenum deposit is located in the Wuzhishan fold belt of the South China fold system, Southern China plate. Nine orebodies of economic value and five mineralized bodies which are approximately parallel to each other have been identified. Ores are mainly of sulfide quartz vein type and K-feldspar granite type. The ores are composed mainly of sulfides such as molybdenite, pyrite, chalcopyrite, galena and sphalerite and gangue minerals such as quartz, potassium feldspar, biotite, sericite and chlorite. The molybdenum content in the Gaotongling granite intrusion is 4 times higher than its clarke value. Potassic alteration, pyritization, silicification, sericitization and chloritization, as well as molybdenum mineralization are observed along structural fractures in the granite intrusion. The ore-forming fluids are of K^+-Na^+-Cl^--F^--SO_4^{2-} type. The sulfur, carbon, hydrogen and oxygen isotopic compositions suggest that the ore-forming materials were mainly derived from magma and that the ore-forming fluids originated by

收稿日期: 2007-12-01; **修订日期**: 2008-01-04
地调项目: 中国地质调查局国土资源调查项目《海南岛高品位大型热液金矿床调查预测与典型矿床研究》(编号: 200110000003)和《中国成矿体系与区域成矿评价》(编号: K1·4)资助。
作者简介: 廖香俊(1961-), 男, 研究员, 在读博士, 地球化学专业, 从事地质勘查和地质环境研究。E-mail: liaoxj@hi.gov.cn

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

mixed sources of magmatic water and meteoric water. The Re- Os isochron age of molybdenite is 98.4±2.5 Ma, which coincides with the emplacement age of the Gaotongling granite intrusion. It is concluded that the deposit is a hydrothermal sulfide- quartz vein type deposit genetically related to Late Mesozoic (late Yanshanian) granitic magmatism.

Key words: geology and geochemistry; ore- forming age; molybdenum deposit; Tunchang, Hainan

高通岭钼矿床位于屯昌县乌坡镇北西约3 km处, 海拔高程为167 m。该矿床是由海南省地质调查院通过1∶5万区域地质调查工作, 在发现1处具成矿远景的辉钼矿化点的基础上, 于1998—1999年开展矿区普查工作, 并于近年完成详查工作后所查明的, 共控制钼矿体和矿化体14个, 其中品位和最低可采厚度达到工业要求的矿体为9个, 提交的钼矿储量已达小型规模。该矿床是琼中地区首次发现和查明的具工业意义的热液石英脉型钼矿床[1], 其勘查经验和有关研究成果对区域上寻找钼矿床具有借鉴意义。王平安等①和廖香俊等[2]曾在论述海南岛区域成矿规律和矿床成矿系列时对该矿床进行了分类。本文在矿区普查和详查工作的基础上, 结合中国地质调查局国土资源调查项目的研究成果, 对高通岭钼矿床的地质特征、地球化学特征、矿床成因和成矿时代进行较为系统的论述。

1　区域地质背景

海南岛处于华南板块南部, 岛内近EW向的断裂带最为醒目, 其次为NE向和NNE向断裂, 近NS向和NNW向断裂一般规模较小。以九所- 陵水断裂带为界, 北部为华南褶皱系, 南部为南海地台之琼南微陆块。华南褶皱系以王五- 文教断裂带为界, 又划分为南部的五指山褶皱带和北部的雷琼断陷区[3-4]。

高通岭矿区位于华南褶皱系五指山褶皱带北东段偏中部、昌江- 琼海深大断裂南侧。区域上广泛发育印支期二长花岗岩基和燕山期晚期花岗闪长岩基、二长花岗岩体, 其中出露面积较大的为晚三叠世黑云二长花岗岩和早白垩世花岗闪长岩、黑云正长花岗岩, 而晚三叠世角闪黑云正长花岗岩, 早白垩世角闪石英闪长岩、黑云角闪二长花岗岩, 晚白垩世花岗斑岩等岩体零星分布[4-6]。矿区及其附近出露燕山晚期高通岭正长花岗岩体、乌石石英闪长岩体和一些基性—中酸性脉岩(图1、图2)。

区域内发育有EW向的昌江- 琼海深大断裂及NE、NW、NS向断裂。EW向的昌江- 琼海深大断裂横跨整个区域, 该断裂带至少在加里东期就已形成, 在海西期、印支期和燕山期仍有强烈活动; NE、NW、NS向断裂带生成于燕山晚期[4-6]。近NS向高通岭断裂穿越矿区向两边延伸, 在区内长约3.0 km, 出露宽度几十厘米至几十米。断裂带中充填石英脉、煌斑岩脉和构造角砾岩。

大规模岩浆的侵入和后期地壳抬升运动所造成的强烈剥蚀, 使现今该区地层不发育, 无沉积岩和区域变质岩露头。与钼矿成矿作用关系密切的地质作用主要为岩浆作用、断裂构造作用及热液活动。

2　矿床地质

2.1　矿区侵入岩

区域上广泛出露印支期的琼中二长花岗岩岩基和燕山期晚期(早白垩世)的屯昌花岗闪长岩岩基、黄岭二长花岗岩岩体。矿区及其附近出露燕山晚期高通岭黑云母钾长花岗岩体、乌石石英闪长岩岩体和一些基性—中酸性脉岩(花岗斑岩、闪长岩及辉长岩)(图1、图2)。

屯昌花岗闪长岩基主要分布在高通岭矿区的四周及外围, 发育绢云母化、钠黝帘石化、绿帘石化、绿泥石化等, 见有少量黄铁矿、磁铁矿和辉钼矿。

高通岭岩体呈岩株状分布于矿区中部, 出露面积约3.0 km^2, 岩性为中细粒黑云母钾长花岗岩, 主要矿物成分为钾长石、斜长石、石英、黑云母等。岩株内断裂、节理构造和热液蚀变、矿化现象均很显著, 是高通岭钼矿床的主要赋矿围岩, 其中在NW向和NE向2组节理中往往有辉钼矿、黄铁矿细脉充填, 岩石中亦偶见辉钼矿。

矿区内的燕山晚期脉岩较发育, 主要为花岗斑岩脉、煌斑岩脉, 其次有闪长(玢)岩脉、花岗细晶岩、辉石闪长岩脉、伟晶岩等。脉岩规模及产状变化较大, 单脉宽0.1~20 m, 延伸2~2500 m; 走向以NW、NE、NS向为主, EW向次之。一般NS向岩脉延伸短且多呈透镜状, NW和NE向岩脉延伸较长。花岗斑岩脉走向为NS—NE向, 脉体宽0.3~20 m; 煌斑岩脉以近NS走向为主, 宽仅0.2~1 m, 延伸大于350 m, 多沿节理充填, 往往平行排列且具分叉复合现象, 一般

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

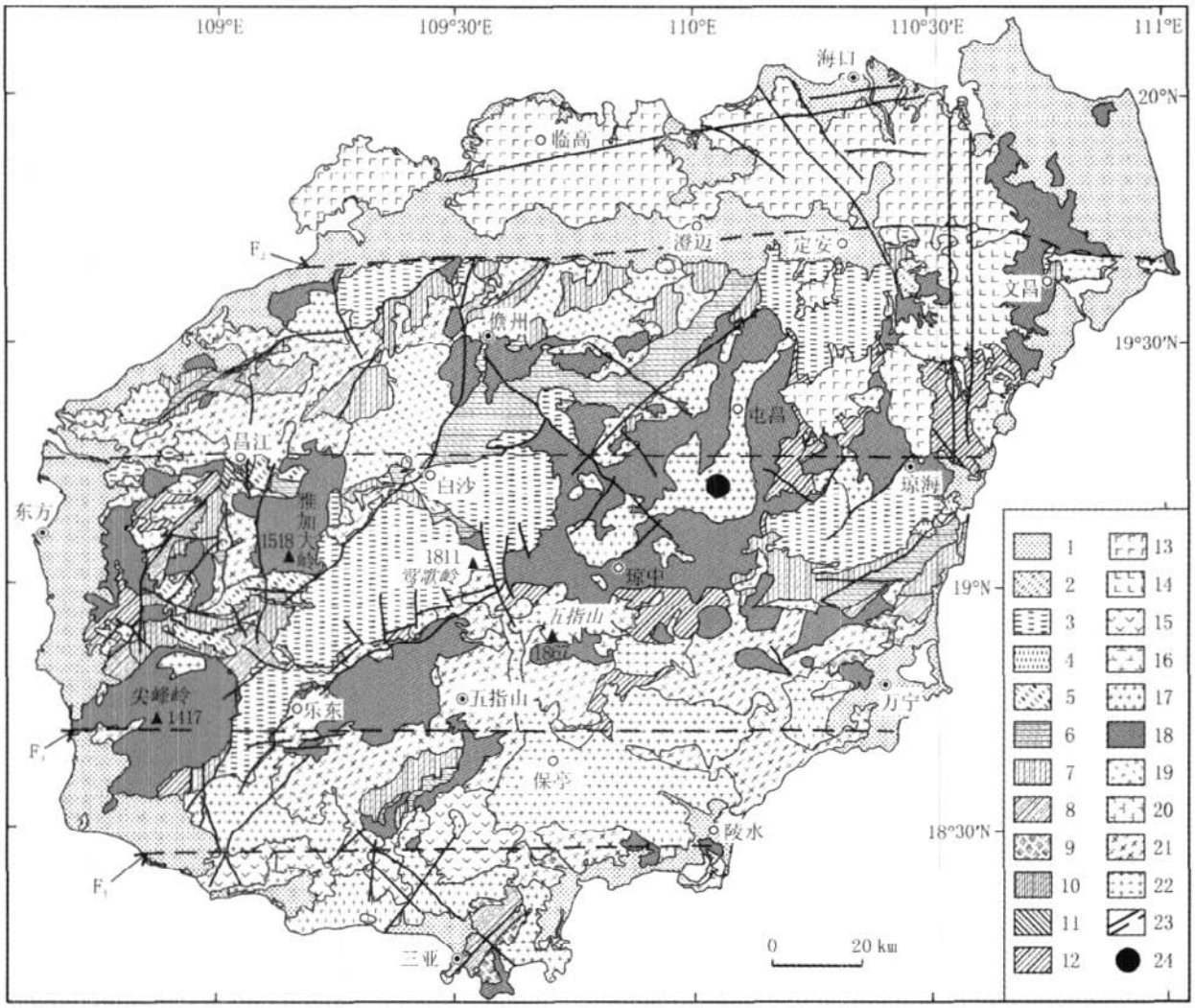

图1 海南岛地质图和高通岭钼矿床的位置(据文献②改编)

Fig.1 Geologic map of Hainan Island with location of the Gaotongling molybdenum deposit

1—第四系;2—古近系和新近系;3—白垩系;4—下三叠统;5—二叠系;6—石炭系;7—志留系;8—奥陶系;9—寒武系;10—志留系;11—新元古界石碌群;12—中元古界长城系抱板群;13—第四纪玄武岩;14—第三纪辉斑玄武岩及辉斑橄榄玄武岩;15—燕山期基性-酸性火山岩及次火山岩;16—燕山期辉长岩及辉绿岩;17—燕山期花岗岩类;18—印支期花岗岩类;19—海西-印支期花岗岩;20—海西期辉长岩;21—海西期花岗岩类;22—中元古代花岗岩和花岗闪长岩;23—断层;24—高通岭钼矿床位置

垂直并切穿矿体,对矿体有一定的破坏作用。

2.2 矿区构造

矿区构造主要表现为2条断层,走向分别为近NS向和EW向。近NS向断裂呈几十厘米至几十米宽的断裂带穿过矿区,长度多逾2500 m,产状80～300°∠57～66°;断裂带中充填有早期煌斑岩脉(总体走向为10°)和其后发育的石英脉(走向近350°),晚期发生构造破碎形成构造角砾岩。NW向断层与近NS向断裂相切,产状30°∠65°,长约2000 m,宽度为1.0 m左右,其内发育构造角砾岩和碎裂花岗岩并见有热液石英脉,沿断裂热液蚀变-矿化现象比较显著,如硅化、黄铁矿化、黄铜矿化、绢云母化和绿泥石化等,并有富集的浸染状辉钼矿化。

高通岭岩体中发育有NNE向和NWW向的2组节理,并表现出近等距分布的特征。NNE向节理组间距为4 m左右,产状280°∠81°;NWW向节理组间距3 m左右,产状为25°∠73°。沿上述2组节理常见浸染状辉钼矿化现象,且在NNE向节理中钼矿化相对

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

较明显。在这些节理中还可见到宽度0.02~0.3 m的不规则透镜体状和扁豆状的石英脉,脉长一般0.3~300 m,其中常含团块状分布的辉钼矿富集体。

2.3　围岩蚀变

围岩的热液蚀变和矿化作用主要沿断裂构造及其两侧发育,主要的蚀变类型有钾长石化、绿泥石化、黄铁矿化、硅化和绢云母化。矿体的主要围岩黑云母钾长花岗岩在水平方向上存在较明显的蚀变与矿化的(顺向)分带现象,以辉钼矿化石英脉为中心,往两侧依次过渡为钾长石化(局部发育)、黄铁矿化、绢云母化和绿泥石化。蚀变强度自矿脉(体)中心向外逐渐减弱。

钾长石化主要出现在脉体的边缘最内侧,但不连续;绿泥石化分布广泛,在硅化、绢云母化蚀变形成的岩石中均有出现,但以浅部辉钼矿化石英脉最外侧的绿泥石化蚀变最明显,为含矿热液交代钾长花岗岩中的黑云母、角闪石所形成,往往与绢云母化相伴出现;黄铁矿化分布普遍,在硅化、绢云母化、绿泥石化各个阶段均有出现,黄铁矿呈粒状、浸染状分布,有时呈微脉、细脉状产出;绢云母为斜长石蚀变而成,平行定向排列,分布在辉钼矿化石英脉最外侧的钾长花岗岩中。

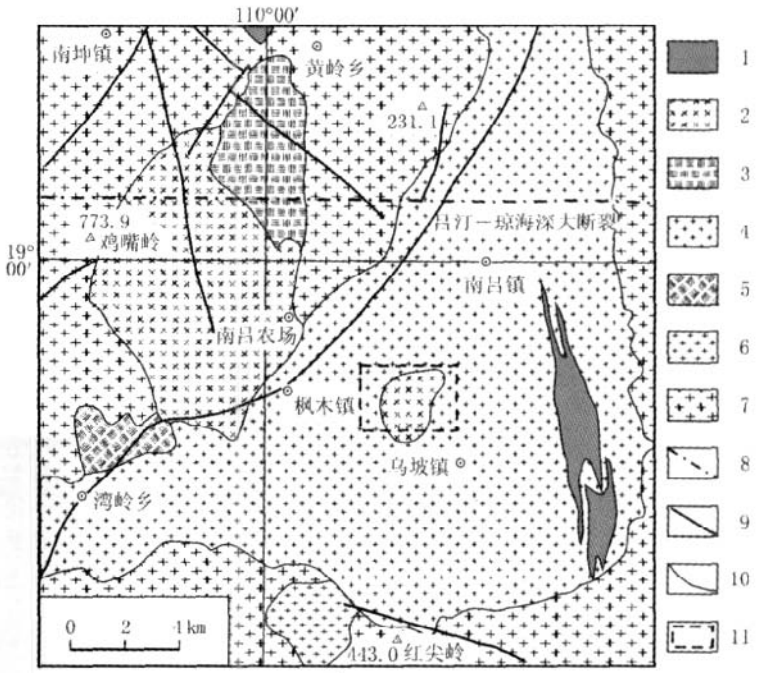

图2　高通岭钼矿床区域地质图

Fig.2　Regional Geologic map of the Gaotongling molybdenum deposit

1—晚白垩世花岗斑岩;2—早白垩世(角闪石)黑云钾长花岗岩;3—早白垩世黑云角闪二长花岗岩;4—早白垩世黑云角闪花岗闪长岩;5—早白垩世角闪石石英闪长岩;6—晚三叠世角闪黑云正长花岗岩;7—晚三叠世(角闪石)黑云母二长花岗岩;8—深大断裂;9—断裂;10—地质界线;11—矿区(登记)范围

2.4　矿体地质

高通岭钼矿赋存于高通岭花岗岩体中。矿体呈脉状,其顶、底板均为早白垩世黑云钾长花岗岩。矿体呈NW向平行展布,形成地表宽约200 m、深部宽约100 m、长度约600 m的矿化带(图3至图5),带中矿体呈平行脉状分布,间距一般10~20 m。矿化带以高通岭为中心,走向一般为115~123°,倾向NE,倾角49~85°。矿体在高通岭地势较高地段的地表局部有出露(V_1、V_2、V_3、V_4、V_6、V_7、V_8、V_9、V_{11}矿体),出露标高一般为134~163 m,埋深-192~250 m。

矿体地表长一般200~400 m,最长(V_9矿体)529 m,厚一般1~2 m,最厚(V_2矿体)3.61 m,倾向延深一般100~200 m,最深390 m。各矿体的平均钼品位为0.03%~0.28%,一般0.06%~0.28%,块段最高为2.70%,全矿床平均钼品位为0.099%。规模较大的矿体是V_1、V_2、V_8、V_9号矿体。

矿体中心往往为含辉钼矿的石英-多金属硫化物脉,其两侧有时发育浸染状矿化。矿体中辉钼矿大部分呈细脉状或团块状产于石英脉两侧,或直接产于节理裂隙中。

经详查,带中共圈出钼矿体和矿化体14个,其中9个矿体达到最低可采厚度和最低工业品位的要求。

2.5　矿石的矿物成分及矿石类型

矿石主要金属矿物有辉钼矿、黄铁矿和黄铜矿,少量方铅矿、闪锌矿和辉铋矿,地表和浅部偶见钼华、孔雀石等次生氧化矿物;脉石矿物主要为石英,次有钾长石、黑云母、绿泥石、方解石等。

本矿区氧化矿石不发育,基本为原生矿石。对槽探及钻孔中的12个样品进行了氧化态(MoO_3)和硫化态(MoS_2)物相分析(表1),结果显示地表探槽样品中硫化态的钼所占的比例很低(2.44%~30.08%,平均仅12.18%),且品位低,深部钻孔样品中硫化态的钼所占比例很高(占96.18%~98.80%,平均达

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

97.87%)，说明地表矿体严重风化淋滤，深部矿体基本无风化。相变带埋深约为3~5 m。

据矿石的组构和矿物成分，将其划分为含钼石英脉型和含钼钾长花岗岩型2种矿石类型，前者在石英脉中发育浸染状或细脉浸染状辉钼矿，后者辉钼矿以浸染状分布在钾长花岗岩中(图6)。

含钼石英-硫化物脉：金属矿物成分主要为黄铜矿(含量3%~6%左右，局部达40%)，其次为黄铁矿(含量7%~10%)，少量闪锌矿(含量5%左右)、辉钼矿(含量2%左右)，微量方铅矿；脉石矿物主要是石英。

含钼黄铁矿化钾长花岗岩：金属矿物有黄铁矿(含量6%左右)、辉钼矿(3%左右)和黄铜矿(6%左右)，少量辉铋矿和方铅矿。非金属矿物主要是钾长石、石英、黑云母，少量绿泥石。此外还有钾长花岗岩的副矿物磁铁矿、榍石、磷灰石、金红石(<1%)等。

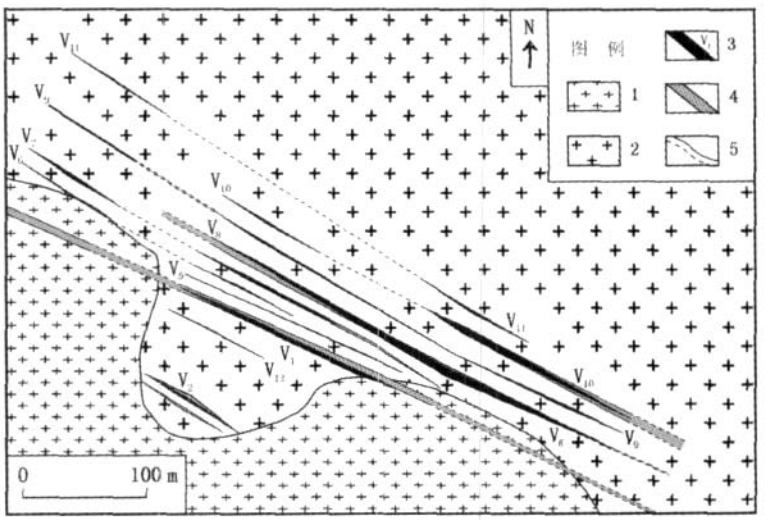

图3 高通岭钼矿床+80 m中段矿体平面图

Fig.3 Schematic plan view of +80 metre level of the Gaotongling molybdenum deposit

1—早白垩世钾长花岗岩；2—早白垩世二长花岗岩；3—矿体及编号；4—矿化蚀变带；5—实测及推测地质界线

2.6 矿石结构构造

含钼石英脉矿石：主要呈自形半自形叶片状、他形鳞片状结构，脉状穿插构造。不规则状的含矿石英脉及团块穿插在弱蚀变的花岗岩中，含矿石英脉的脉宽多在5~22 mm之间，辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿等在含矿石英脉及团块中的分布不均匀。

含钼黄铁矿化钾长花岗岩矿石：主要呈包含及碎裂结构，浸染状和细脉-浸染状构造。在含钼黄铁矿化钾长花岗岩中，细粒石英、辉钼矿与黄铁矿等构成包含结构、浸染状构造；在钾长花岗岩的构造裂隙中，由热液充填形成的辉钼矿及其他硫化物与石英、方解石等形成碎裂结构、细脉浸染状构造。

表1 高通岭钼矿床探槽和钻孔中矿石样品物相分析结果

Table 1 Phase analysis of ore samples from prospecting trenches and boreholes of the Gaotongling molybdenum deposit

工程位置	工程号	样号	MoO_3	氧化态Mo含量(占MoO_3的57.2%)	MoS_2	硫化态Mo含量(占MoS_2的59.94%)	Mo总含量	硫化态Mo占比例/%
钻孔	ZK0701	H1	32.21	18.42	774.18	464.04	482.47	96.18
		H13	69.12	39.54	2497.70	1497.12	1536.66	97.43
	ZK0101	H2	8.84	5.06	314.68	188.62	193.68	97.39
	ZK0003	H34	23.50	13.44	1186.00	710.89	724.33	98.14
		H35	22.80	13.04	1368.00	819.98	833.02	98.43
	ZK0402	H21	18.90	10.81	1479.00	886.51	897.32	98.80
		H22	158.60	90.72	11770.00	7054.94	7145.66	98.73
	钻孔样品平均							97.87
探槽	TC0901	H2	25.64	14.67	10.53	6.31	20.98	30.09
		H9	152.73	87.36	7.34	4.40	91.76	4.79
	TC0201	H4	77.28	44.20	13.11	7.86	52.06	15.09
		H10	1059.06	605.78	25.29	15.16	620.94	2.44
	TC0401	H4	98.21	56.18	8.70	5.21	61.39	8.49
	探槽样品平均							12.18

注：由海南省地质测试研究中心测试，分析方法为X荧光法，使用仪器及型号为X4-PIOEERE；含量为10^{-6}

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

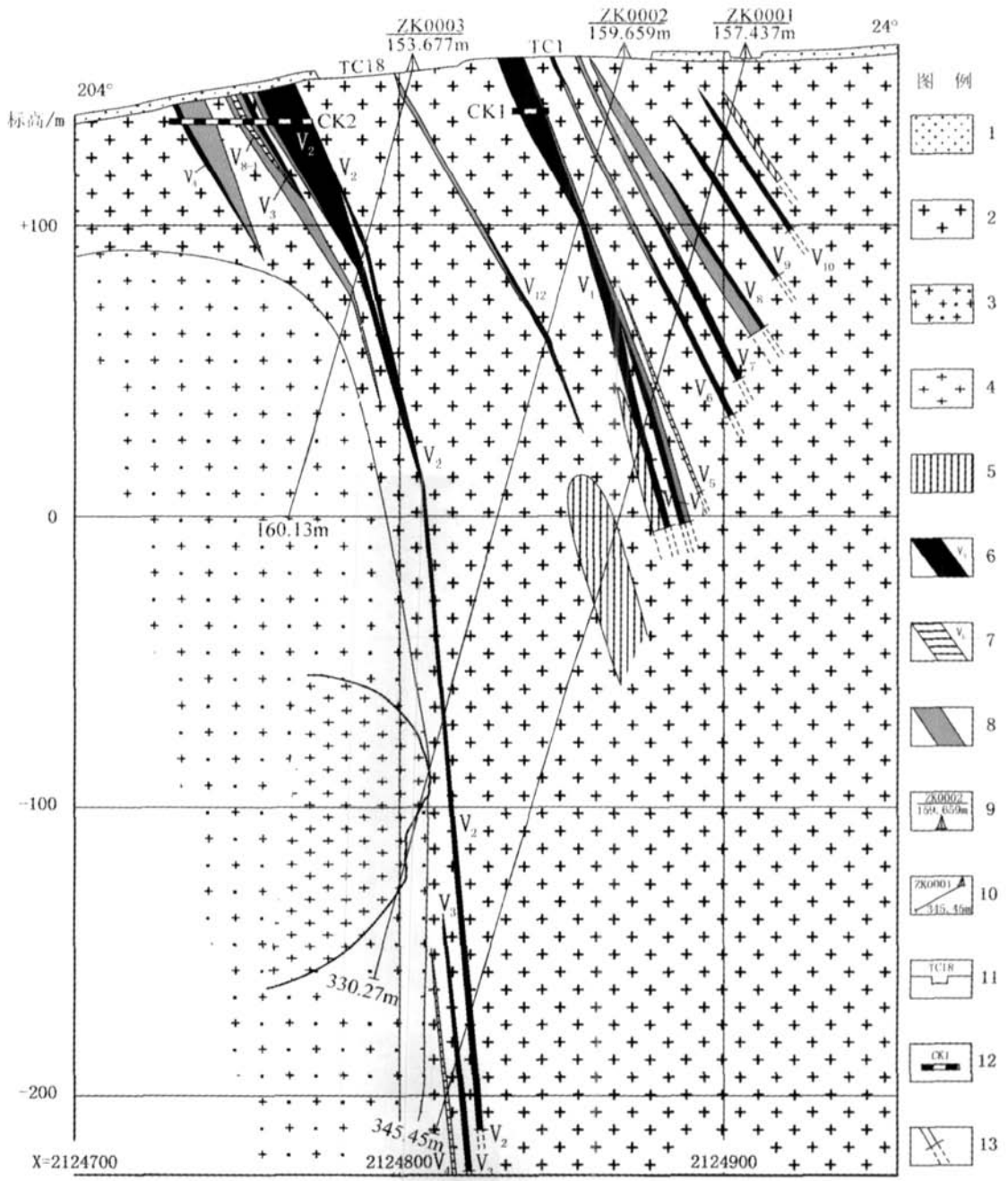

图4　高通岭钼矿床00号勘探线剖面

Fig.4　Geologic profile along the No.00 exploration line of the Gaotongling molybdenum deposit

1—第四系残坡积层;2—燕山晚期(早白垩世)黑云母钾长花岗岩;3—燕山晚期(早白垩世)二长花岗岩;4—花岗斑岩;5—煌斑岩脉;6—钼矿体及编号;7—钼矿化体及编号;8—矿化蚀变带;9—完工钻孔之钻孔编号/开孔标高;10—完工钻孔之钻孔编号及终孔深度;11—探槽位置及编号;12—采坑位置、编号及示意的采样位置;13—资源/储量估算外推边界

3　矿床地球化学特征

3.1　成矿流体的成分与类型

对1件石英样品中的流体包裹体成分进行了测定。结果显示,液相成分主要离子含量Na^+为1.261、K^+1.796、Mg^{2+}0.060, Cl^- 4.369、F^- 1.767、SO_4^{2-} 1.020 (10^{-6}),可见阳离子为K^+- Na^+型,阴离子为Cl^- - F^- - SO_4^{2-}型;气相成分以H_2O为主(97.595 mol%),其次

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

为CO_2(1.483 mol%)，少量N_2(0.301 mol%)、C_2H_6(0.190 mol%)、Ar(0.126 mol%)和H_2S(0.005 mol%)(表2、表3)。初步研究表明，高通岭钼矿床成矿流体属于K^+-Na^+-Cl^--F^--SO_4^{2-}型，并具有亲岩浆流体的成分特征[7]。

3.2 稳定同位素组成

样品的稳定同位素测试工作由中国地质科学院矿产资源研究所稳定同位素实验室完成，C、H、O同位素使用MAT-251质谱计测定，方法总精度δD值为±3‰，$\delta^{13}C$和$\delta^{18}O$值为±0.3‰。

取自V_1、V_2号矿脉中的辉钼矿和黄铁矿的S同位素测试结果(表4)显示，2件黄铁矿样品的$\delta^{34}S$值分别为+2.9‰和+3.0‰，低于辉钼矿的+4.4‰和+5.5‰，据其$\delta^{34}S$值的变化范围和对比2种矿物之间的$\delta^{34}S$值，可判定成矿物质中的S属岩浆来源[8-10]。

对1件石英样品的矿物O同位素和流体包裹体水的H、O同位素组成进行了测定，石英矿物的$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$值为+14.1‰，流体包裹体水的$\delta D_{V\text{-}SMOW}$值为-55‰。由于在磨制的包裹体片中没有找到可供测温的流体包裹体，本文根据估计的成矿温度(大致为170~330℃)，按照Taylor[11-12]提出的石英-水体系O同位素平衡公式，计算得到流体水的$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$值为+0.3‰~+8.2‰。可见流体水的H、O同位素组成介于岩浆水[10]与大气降水线之间[13-14]，其来源既有岩浆流体也有大气降水(图7)。

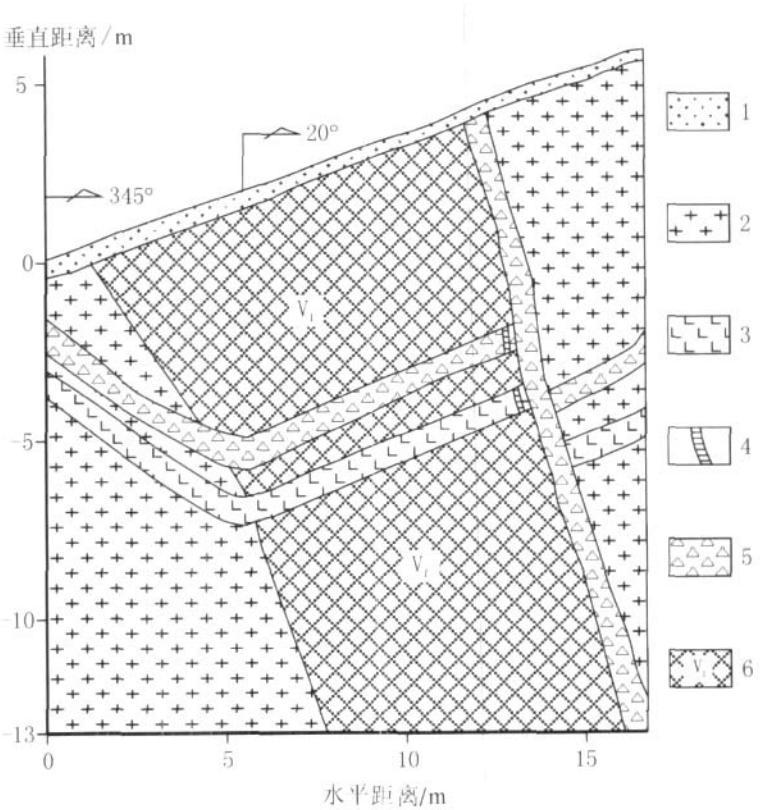

图5 高通岭钼矿床CK1采坑V_1矿体素描

Fig.5 Sketch of No.V_1 orebody at CK1 mining pit of the Gaotongling molybdenum deposit

1—第四系残坡积层；2—早白垩世黑云母钾长花岗岩；3—煌斑岩脉；4—石英脉；5—构造破碎带；6—矿体及编号

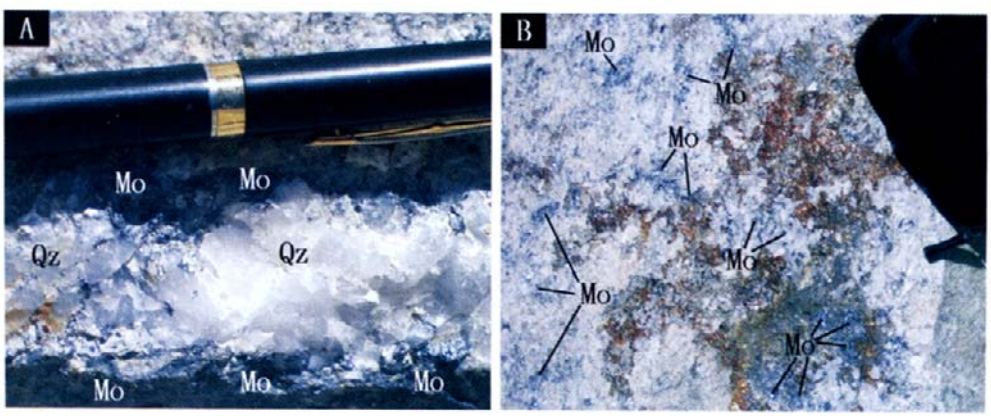

图6 高通岭钼矿床石英脉型矿石(A)和浸染状含钼钾长花岗岩型矿石(B)

Fig.6 Photos showing quartz-vein (A) and disseminated Mo-bearing moyite type (B) ores of Gaotongling

Mo—辉钼矿；Qz—石英

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表2　高通岭钼矿床矿石中石英的流体包裹体液相成分测试结果

Table 2　Liquid phase composition of fluid inclusions in quartz in ores from the Gaotongling molybdenum deposit

样品号	矿物	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}
GTL01-5-1	石英	1.261	1.796	少量	0.060	1.767	4.369	1.020

注:由中国地质科学院矿产资源研究所测试,测试仪器为国产苏晖 9442 型原子吸收光谱仪、美国 DIONEX 公司 2120i 型离子色谱仪。样品洗净后研磨或热爆水浸取,浸取液利用 ASS 和 HPIC 法测定阴、阳离子。离子含量为 10^{-6}

流体包裹体气相CO_2的C同位素组成有一件测试结果,$\delta^{13}C_{-V-PDB}$值为-6.6‰。已知岩浆来源的C同位素组成与正常地幔的$\delta^{13}C$值相一致,为-5‰±2‰[8,15]。相互比较即可看出,高通岭钼矿床成矿流体中的C同位素组成具有强烈的岩浆来源信息,反映出成矿流体中的C以岩浆源为主。

3.3　矿体围岩的含矿性

高通岭花岗岩体多元素分析工作由国家地质测试研究中心完成。样品为取自V_1号矿脉附近的蚀变黑云母钾长花岗岩,分析结果为:Mo 47.0×10^{-6}、Cu 34.9×10^{-6}、Pb 25.7×10^{-6}、Zn 22.0×10^{-6}、Au 0.45×10^{-6}、Ag 0.13×10^{-6}、As 2.00×10^{-6}、Bi 0.14×10^{-6}。花岗岩中的Mo和Au含量很高,Mo含量比其Clarke值[16-17]高出30倍,Au高出110多倍;相对于维氏世界酸性火成岩的平均值[18],高通岭花岗岩的Mo含量高出近4倍,Au含量高出近100倍,Bi高出13倍。这一信息暗示,该岩体极有可能是热液型钼矿的成矿母岩。

3.4　矿　体

该矿床除钼具工业意义外,还伴生有铜、铅、锌等多种元素。早期勘查阶段获得的分析结果显示,主矿体中有多个样品的Cu元素含量接近或达到综合利用品位,最高含量达0.25%,已达工业矿体的边界品位,个别样品的Pb元素含量接近综合利用品位[1]。

表3　高通岭钼矿床矿石中石英的流体包裹体气相成分测试结果

Table 3　Gas composition of fluid inclusions in quartz in ores from the Gaotongling molybdenum deposit

样品号	矿物	H_2O	CO_2	CH_4	C_2H_6	H_2S	N_2	Ar
GTL01-5-1	石英	97.595	1.483	0	0.190	0.005	0.601	0.126

注:由中国地质科学院矿产资源研究所测试,测试仪器为日本理工 RG202 四极质谱仪,仪器精度小于 5%。群体包裹体在 100~500℃温度下热爆释放气体后,收集气体并测定。成分含量单位为 mol%

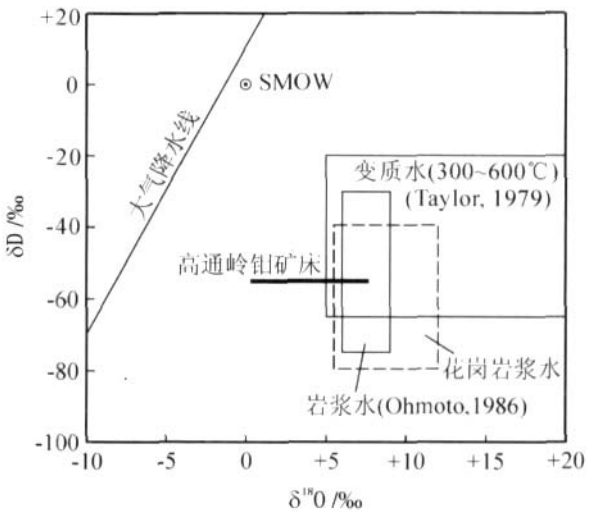

图7　高通岭钼矿床成矿流体水的H、O同位素组成图解

Fig.7　Hydrogen and oxygen isotope compositions of water in fluid inclusions from the Gaotongling Mo deposit

大气降水线采用的计算公式[13]为$\delta D=8\delta^{18}O+10$

表4　高通岭钼矿床矿石中辉钼矿和黄铁矿的S同位素测试结果

Table 4　Sulfur isotopic composition of molybdenite and pyrite in ores from the Gaotongling molybdenum deposit

样品号	取样位置	样品名称	$\delta^{34}S_{V-CDT}$/‰
GTL01-5-1	V_1号矿脉	黄铁矿	+3.0
GTL01-5-1	V_1号矿脉	辉钼矿	+5.5
GTL01-5-4	V_1号矿脉	黄铁矿	+2.9
GTL02-1-2	V_2号矿脉	辉钼矿	+4.4

注:由中国地质科学院矿产资源研究所测试,制取SO_2的方法为将硫化物与CuO、V_2O_5混合氧化剂在高温真空条件下反应制取SO_2;测定仪器为MAT152C质谱计;采用国际标准CDT;测定方法总精度为±0.2‰

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

鉴于钼矿床中常伴生钨、铋、铅、锌、铜、金、银、硫、铍、锂、铼等，地质详查阶段在矿石基本分析的副样中抽取部分样品进行组合，在5个钼矿体中各形成1个组合样品。组合分析结果见表5。

组合分析的结果显示，所测元素的含量范围分别为：Au 0.87×10^{-9}~4.54×10^{-9}、Ag 0.28×10^{-6}~5.00×10^{-6}、WO_3 0.0015%~0.208%、Sb<5×10^{-6}、Cu 33×10^{-6}~404×10^{-6}、Pb 28×10^{-6}~55×10^{-6}、Zn 24×10^{-6}~38×10^{-6}、Be 0.52×10^{-6}~1.77×10^{-6}、Re<0.50×10^{-6}~23×10^{-6}、S 0.0439%~0.1554%、Bi<0.5×10^{-6}、Li 2.77×10^{-6}~4.51×10^{-6}。根据上述结果可知，本区矿体中可供综合利用的伴生组分只有Re(铼)，且只有2个样品大于综合评价标准(Re的综合评价标准为10×10^{-6})；WO_3只有1个样品接近综合评价标准，为0.208%(WO_3的综合评价标准为0.4%)。因此本矿区可供综合利用的共/伴生矿产有铼(Re)和钨(W)。

因组合分析样品数目较少，本结果仅供参考。

4 Re-Os同位素测年及矿床的成矿时代

为了了解高通岭钼矿床形成的确切年龄，采集了V_1、V_2、V_3和V_4号矿脉中的辉钼矿样品进行Re-Os同位素模式年龄测定，测定结果见表6。对测定结果采用ISOPLOT软件作图，^{187}Re、^{187}Os的相对误差分别输入2.5%和2.0%(2σ)，得到等时线年龄为98.4 Ma±2.5 Ma，^{187}Os初始值为0.00012±0.00016(图8)。

上述结果显示，高通岭钼矿床的成矿时代为早白垩世晚期，而赋矿围岩屯昌超单元高通岭单元细粒黑云母钾长花岗岩的锆石U-Pb年龄为95.6 Ma±1.6 Ma[1]，亦属早白垩世晚期。这2个年龄值在误差范围内是一致的。因此，从时间和空间关系上可以推断，高通岭钼矿床的成因与高通岭花岗岩体有关。

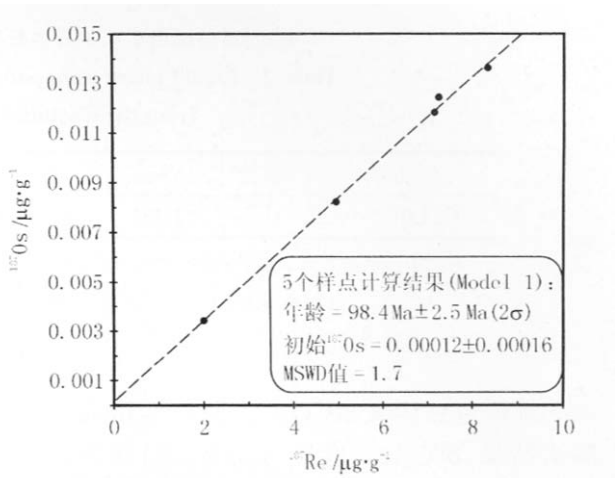

图8 高通岭钼矿床辉钼矿的Re-Os年龄等时线

Fig.8 Re-Os isochron for molybdenites from the Gaotongling molybdenum deposit

该结果亦与琼西地区乐东县石门山钼银多金属矿床与成矿有关的花岗岩的放射性同位素测年结果(82.5~87 Ma[19]、93.7 Ma[3])相仿。

5 矿床成因及区域成矿规律

5.1 矿床类型和成因

高通岭钼矿床产于钾长花岗岩侵入体中，钼的主要成矿作用明显晚于岩体的成岩作用，即在主要成矿作用时岩体作为容矿岩石存在。矿体为脉状，矿石为细脉—浸染状。矿化富集程度主要表现为含辉钼矿细脉的富集程度，在细脉间伴有浸染状辉钼矿化。据此认为该矿床为断裂破碎带充填热液石英脉型。

根据地质产状和世界钼矿床成因类型的普遍性，又考虑本次工作所获得的成矿流体的成分、类型

表5 高通岭钼矿床5个矿体矿石组合样品的分析结果

Table 5 Composite analysis of ores from five orebodies of the Gaotongling molybdenum deposit

样号	矿体号	Au	Ag	WO_3	Sb	Cu	Pb	Zn	Be	Re	S	Bi	Li
Z1	V_1	2.671	>5.0	29	<5	216	38	24	1.768	<5	439	<0.5	3.77
Z2	V_2	1.627	0.279	26	<5	115	28	26	0.779	<5	987	<0.5	4.51
Z3	V_7	0.871	2.788	15	<5	189	46	26	1.010	<5	1042	<0.5	3.91
Z4	V_8	4.541	2.141	2080	<5	404	34	38	0.688	11	1554	<0.5	4.21
Z5	V_9	3.131	0.781	28	<5	33	55	31	0.523	23	1184	<0.5	3.90

注：由海南省地质测试研究中心测试，分析方法：Au、Ag为原子吸收法，使用仪器及型号为GGX-600；Sb、Bi为原子荧光法，使用仪器及型号为AFS-820；其他元素为X荧光法，使用仪器及型号为X4-PIOEER。Au含量为10^{-9}，其他元素为10^{-6}

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表6　辉钼矿系列样品的Re、Os含量及模式年龄测定结果

Table 6　Re and Os contents and model age dating of molybdenite samples from the Gaotongling molybdenum deposit

样　号	样品位置	矿物组合	样重/g	Re /μg·g^{-1}	^{187}Re /μg·g^{-1}	^{187}Os /ng·g^{-1}	模式年龄 /Ma
GTL01-5-1	V_1 号矿脉	石英－黄铁矿－辉钼矿	0.02284	11.58 (0.11)	158.8 (1.5)	7.28 (0.07)	102.4 (1.5)
GTL02-1-1	V_2 号矿脉	石英－辉钼矿	0.17824	3.19 (0.04)	270.8 (2.8)	2.00 (0.02)	102.1 (1.4)
GTL02-1-4	V_2 号矿脉	石英－辉钼矿	0.09107	11.43 (0.11)	267.0 (2.7)	7.18 (0.07)	98.8 (1.3)
GTL02-10	V_4 号矿脉	石英－辉钼矿	0.07445	13.27 (0.14)	293.3 (3.3)	8.34 (0.09)	97.9 (1.2)
GTL02-11	V_3 号矿脉	含石英、辉钼矿、闪锌矿、黄铁矿等	0.14249	7.95 (0.08)	265.5 (2.7)	5.00 (0.05)	98.6 (1.2)

注:由国家地质测试研究中心测试。括号内的数值为误差(2σ),其中 Re 和 Os 含量的计算误差包括稀释剂标定误差、质谱测量误差、质量分馏校正误差等。模式年龄的计算误差包括稀释剂标定误差、质谱测量误差、质量分馏校正误差和 ^{187}Re 衰变常数 λ 的不确定度(1.02%)。模式年龄 t 按下式计算:$t=1/\lambda[\ln(1+^{187}Os/^{187}Re)]$,其中 λ(^{187}Re 衰变常数)$=1.666\times10^{-11}/a$。铼锇化学分离方法:Carius 管王水溶样,蒸馏法纯化 Os,丙酮萃取分离 Re,采用英国产 VG PQ EXCELL ICP-MS 进行质谱测量。本实验全流程空白,Re 为 0.02 ng,Os 为 0.003 ng

和C、H、O、S同位素数据资料反映的成因信息,可以判断高通岭钼矿床的成因为与花岗岩浆活动有关的热液成因。控矿因素主要为燕山晚期的花岗岩和断裂、节理,沿线性构造发育的石英脉、蚀变带和化探异常是主要的找矿标志。

5.2　区域成矿规律

从区域成矿背景和成矿规律来看,高通岭钼矿床应属于燕山期五指山褶皱带、南海地台与花岗岩浆侵入和陆相中酸性火山活动有关的金、钼、铁、铜、铅、锌、银、铀、钨、锡、稀有稀土金属、萤石、水晶、硅灰石矿床成矿系列,矿床类型式归属石门山式,成因类型为热液石英-硫化物脉型[2]。该矿床成矿系列所包括的矿床(点)一般规模较小,数量也不很多。琼西地区的乐东县石门山-看树岭与燕山晚期花岗岩有关的热液石英脉型钼银矿床,是本矿床成矿系列中钼矿床的典型代表之一。琼中及其相邻的五指山地区出露大面积的燕山期花岗岩类侵入体,其中部分岩体的岩性和侵入时代与高通岭岩体相似,岩体中Mo的背景含量均高出维氏酸性岩平均值[18]10~20倍,铜、铅、锌含量亦较高[1,5-6],可能成为钼、铜、铅、锌的成矿母岩。在该区已相继发现多处热液脉型铜、铅、锌多金属矿化,进一步找矿的空间较大。此外,近年在琼海县烟塘地区的梅岭发现的与燕山晚期花岗闪长岩和花岗闪长斑岩密切相关的爆破角砾岩筒型(亦可能为斑岩型)铜钼矿床[20],也应属于此矿床成矿系列。

在华南大陆地区,该矿床成矿系列有对应的类型,并且矿床数量众多,其成矿强度要明显高于海南岛。

6　讨论和结论

高通岭钼矿床位于华南板块南部的华南褶皱系五指山褶皱带北东段,区域上发育大量印支—燕山期的花岗岩类和EW、NE、NW、NS向断裂。矿区及附近发育燕山晚期的花岗闪长岩体、黑云母钾长花岗岩体及基性—中酸性脉岩。高通岭花岗岩体中发育近NS向和近EW向断裂构造,矿化-蚀变作用沿断裂及其两侧发育;花岗岩中Au和Mo的含量分别比其Clarke值高出110和30倍,比世界酸性火成岩平均值高100和近4倍。

经1∶5万区调、普查和详查工作,已证实矿区为一小型钼矿床。共查明脉状矿体和矿化体14个,其中 V_1、V_2、V_4、V_6、V_7、V_8、V_9、V_{12}和V_{13}等9个矿体达到最低可采厚度和最低工业品位的要求,为可开发利用的钼矿体,并对其进行了资源/储量估算;V_3、V_{10}、V_{11}和V_{14}等4个矿体未达到最低工业品位的要求,为暂不可开发利用钼矿体,亦对其进行了资源/储量估算;另外 V_5 矿体未达到最低可采厚度和最低工业品位,仅对其作为矿化体圈出,不进行资源/储量估算。

所有矿体和矿化体均沿 NW—NWW 向近平行展布,矿体长 200~529 m,厚 1~3.61 m,斜深 100~390 m,矿体平均品位为 Mo 0.03%~0.28%,块段最高

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.70%，全矿床平均品位 0.099%。矿(化)体中心多为含辉钼矿的石英- 多金属硫化物脉，两侧可发育浸染状矿化。矿石分为含钼石英脉型和含钼钾长花岗岩型 2 种类型，矿石中含辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和辉铋矿，脉石矿物有石英、钾长石、黑云母、绢云母、绿泥石、方解石等；除 Mo 外，矿石中的 Cu、Pb、Zn、Re 和 W 具有一定的综合利用价值。成矿流体属于 K^+- Na^+- Cl^-- F^-- SO_4^{2-} 型，具亲岩浆流体成分的特征。黄铁矿和辉钼矿的 $\delta^{34}S$ 值分别为+2.9‰～+3.0‰和+4.4‰～+5.5‰，流体水的 δD 值为- 55‰、$\delta^{18}O$ 值为+0.3‰～+8.2‰，表明流体水为岩浆水和大气降水的混合来源；包裹体中 CO_2 的 $\delta^{13}C$ 测试值为- 6.6‰，具岩浆源的性质。

矿体中辉钼矿的 Re- Os 等时线法年龄为 98.4 Ma±2.5Ma，^{187}Os 初始值为 0.00012±0.0001；高通岭钾长花岗岩体的锆石 U- Pb 年龄为 95.6 Ma±1.6 Ma。该矿床是与早白垩世晚期花岗岩浆侵入活动有关的热液石英- 硫化物脉型钼矿床，属于燕山期五指山褶皱带、南海地台与花岗岩浆侵入和陆相中酸性火山活动有关的金、钼、铁、铜、铅、锌、银、铀、钨、锡、稀有稀土金属、萤石、水晶、硅灰石矿床成矿系列，矿床类型式归属石门山式。

高通岭钼矿床虽然规模不大，但在海南岛内的钼矿床中具有一定的代表性，进一步的研究工作可以考虑与琼西地区、华南大陆地区同类的钼矿床对比，结合琼中地区花岗岩类特别发育的特点，预计可为琼中地区寻找新的钼矿产地的勘查实践提供科学思路和宏观部署方面的指导。

致谢：本文引用了海南省地质调查院关于高通岭矿区普查和详查报告的部分资料，Re- Os 同位素年龄测试承蒙国家地质测试研究中心杜安道、屈文俊研究员的大力协助，在此一并致以诚挚的感谢。

参考文献：

[1]陈沐龙,符策锐,庄有光,等.琼中地区首次发现热液石英脉型钼矿床[J].华南地质与矿产,2002,(1):9.

[2]廖香俊,王平安,丁式江,等.海南岛主要成矿系列与矿床成矿规律研究[J].地质力学学报,2005,11(2):187- 194.

[3]广东省地质矿产局.广东省区域地质志[M].北京:地质出版社,1988.

[4]汪啸风,马大铨,蒋大海.海南岛地质(三):构造地质[M].北京:地质出版社,1991.

[5]汪啸风,马大铨,蒋大海.海南岛地质(二):岩浆岩[M].北京:地质出版社,1991.

[6]刘公民.海南岛花岗质侵入岩研究的新进展[J].广东地质,1991,6(4):87- 94.

[7]Roedder E. Fluid inclusions as samples of ore fluids[C]//Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits (2nd ed). New York: John Wiley & Sons, 1979:684- 737.

[8]张理刚.稳定同位素在地质科学中的应用——金属活化热液成矿作用及找矿[M].西安:陕西科学技术出版社,1985.

[9]Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Economic Geology, 1972, 67(5):551- 578.

[10]Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits[C]//Valley J W, Taylor H Y, O'Neil J R. Stable isotope in high temperature geological processes. Reviews in Mineralogy. Mining Society of America, 1986, 16:491- 559.

[11]Taylor H Y Jr. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. Economic Geology, 1974, 69:843- 883.

[12]Taylor H Y. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits [C]//Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits (2nd ed). New York: John Wiley & Sons, 1979:263- 277.

[13]Craig H. Isotope variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133: 1702- 1703.

[14]张理刚,郭英顺,黄怀秀,等.南岭及周围地区现代大气降水成矿作用稳定同位素地球化学[C]//中国地质科学院宜昌地质矿产研究所.南岭地质矿产科研报告集第二辑.武汉:中国地质大学出版社,1989:364- 399.

[15]Faure G. Principles of isotope geology, 2nd ed[M]. New York: John Wiley & Sons, 1986.

[16]Taylor S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table[J]. Geochemica et Cosmochemica Acta, 1964, 28: 1273- 1285.

[17]Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1985.

[18]Vinogradov A P. Avenge contents of chemical elements in the principal types of igneous rocks of the earth's crust[J]. Geokhimiya, 1962, 7:641- 644 (in Russian: Виноградв А П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженых горных пород Земной Коры[J]. Геохимия, 1962,7:641- 644.

[19]梁新南.海南岛乐东九所地区钼矿成矿地质条件、规律及找矿方向[J].河南地质,1985,(增刊):374- 377.

[20]龙文国,林起玉,范庆贺,等.海南琼海烟塘梅岭铜钼矿床地质特征[J].华南地质与矿产,2003,(3):30- 36.

① 中国地质科学院地质力学研究所.海南岛高品位大型热液金矿床调查预测与典型矿床研究成果报告.2004.

② 海南省地质矿产勘查开发局. 海南省矿床成矿系列及成矿预测. 2001.

③ 广东省地质局海南地质大队. 海南岛乐东县九所地区石门山- 看树岭钼多金属矿区详细普查地质报告.1989.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net