

甘肃党河南山某金矿碲化物的发现及其成因探讨

刘亚非¹, 周宁超¹, 魏小燕¹, 姚珊²

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘要:利用电子探针显微分析技术首次在甘肃党河南山某金矿中发现了碲金银矿、碲银矿、碲金矿、碲铅矿、碲铋矿等碲化物。通过电子探针显微图像观察,发现研究区碲化物均较为细小,赋存状态多以独立矿物形式存在,无连生、交生现象,但空间上与黄铁矿关系密切,多被黄铁矿包裹或产于黄铁矿、石英粒间和黄铁矿裂隙。根据不同碲化物与黄铁矿之间的共生组合关系,推测其形成顺序为碲金矿→碲金银矿→碲铅矿→碲铋矿→碲银矿。依据碲化物矿物组合特征及成矿温度,对其形成时 $f\text{Te}_2$ 与 $f\text{S}_2$ 进行了限定, $\lg f\text{Te}_2$ 范围为 $-15.2 \sim >-11.2$, $\lg f\text{S}_2$ 范围为 $-16.7 \sim -14.4$ 。并认为金矿中 Au、Te 来源与加里东期埃达克质斜长花岗岩体有较大联系,可能为俯冲板片部分熔融形成的埃达克质岩浆与地幔楔相互作用,将成矿元素富集后带入近地表形成含碲化物的金矿床。

关键词:碲化物;碲金矿床;电子探针;斜长花岗岩;党河南山

中图分类号:P618.51

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2015)02-0112-09

Discovery and Genesis of Telluride in a Gold Deposit from the Danghenanshan Area of Gansu Province

LIU Yafei¹, ZHOU Ningchao¹, WEI Xiaoyan¹, YAO Shan²

(1. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: Based on Electron Probe Micro-Analysis (EPMA), tellurides such as petzite, hessite, calaverite, hessite, tellurbimuth were found in a gold deposit in the Danghenanshan area of Gansu province for the first time. According to electron probe microscopic image observation, these telluride minerals are relatively small and have no intergrowth. However, there is a close relationship between telluride minerals and pyrite. Telluride minerals are mainly included in pyrite and some exists among the grain of pyrite and quartz or the crack of pyrite. Based on the association of different telluride and pyrite, this study speculates that the mineral precipitation sequence is calaverite, petzite, hessite, tellurbimuth, and hessite. According to the mineral assemblage characteristics and ore-forming temperature, the values of $f\text{Te}_2$ and $f\text{S}_2$ during ore forming are limited. The range of $\lg f\text{Te}_2$ of ore forming fluids is -15.2 to >-11.2 and the range of $\lg f\text{S}_2$ is -16.7 to -14.4 . The source of gold and tellurium significantly associates with adakitic plagiogranite which is formed by the partially melting of subducted slab occurred during the Caledonian. Ore-forming elements are thus concentrated and brought to the near surface to form the

收稿日期: 2014-06-19; 修回日期: 2015-04-07

基金项目: 中国地质调查局国土资源大调查项目(12120113014500)资助

作者简介: 刘亚非(1955-), 男, 高级工程师, 主要从事电子探针方面的研究工作。E-mail: dogwuwu@163.com

telluride-bearing gold deposit.

Keywords: telluride; Te-Au deposit; EPMA; plagiogranite; Danghenanshan

Te 元素位于化学元素周期表第五周期,第Ⅵ主族,属于氧族元素,相对原子质量为 127.6。虽然 Te 元素属分散元素,地壳克拉克值极低,仅为 0.001×10^{-6} (钱汉东等,2000),但 Te 元素的地球化学性质活泼,与 S 元素的地球化学性质较为相似(张佩华等,2000;刘家军等,2011),可以与众多重金属,如 Cu、Pb、Zn、Sb、Bi、Ni、Hg、Au、Ag、Pt、Pd 等结合形成碲化物、碲硫(硒)化物等多种类型矿物(涂光炽,2000)。在自然界,碲化物多发现于金、金银或金银多金属矿床中(钱汉东等,2000)。前人对该类矿床中碲化物进行了较多的研究,认为 Te 元素在示踪成矿物质来源(钱汉东等,2000;周起凤等,2011)、研究成矿流体的物理化学性质(张招崇等,1997;许虹等,2012)及对于金银等贵金属的搬运(Cristiana et al.,2005)等方面均具有重要意义。

本次研究应用电子探针微区分析在甘肃党河南山某金矿中首次发现了金、银、铅、铋碲化物,并对这些碲化物及金矿物的矿物成分、赋存状态及形成顺序进行了研究,在此基础上对碲化物形成的碲逸度、硫逸度及 Au、Te 元素来源等问题进行了探讨,希望对该地区金矿床的特征及成因研究起到积极的推进作用。

1 区域地质、矿床地质特征

甘肃党河南山地区大地构造位置为南祁构造带(李厚民等,2003),属秦祁昆成矿域(Ⅰ)-祁连成矿带(Ⅱ)-中南祁连金铅锌铜镍钨铬成矿带(Ⅲ)-党河南山加里东期铜金铅镍成矿带(Ⅳ)(贾群子等,2002a,2002b)。其中金矿是该带的优势矿种,已发现多处金、铜金矿床(李汉光等,2007),金的远景储量有望达 100 t 以上,是近年来秦祁昆成矿域找矿效果较好的地区之一(许振纲,2010)。研究矿区主要出露地层为奥陶系,由火山岩(中酸性、中基性火山岩)、灰岩、杂砂岩、凝灰质砂岩和砾岩构成一套浅海-滨海相火山-沉积碎屑岩,地层走向主要为北西向。区内发育加里东晚期中酸性侵入岩岩株,主要由斜长花岗岩、斜长花岗斑岩组成(李厚民等,2003;范俊杰等,2008),地球化学成分高 Sr 低 Y,具埃达克岩特征(王方成等,2011)。矿区构造作用强烈,断裂主要有 2 组,以北西向顺层断裂为主,其次为北东

向断裂,它们控制了岩体的形态,也控制了矿体的展布。区内赋矿岩石主要为碎屑岩,围岩蚀变有绢云母化、绿帘石化、绿泥石化、白云母化、偶见钾化等。另有高岭土化、硅化、黄铁矿化、褐铁矿化等。金矿化与侵入岩体关系密切,主要分布于岩体与围岩的内、外接触带,发育少硫化物石英脉型和蚀变岩型 2 种金矿化类型,其中以石英脉型金矿化为主,品位高,明金多,易采选,是矿山目前开采的主要对象(李厚民等,2003)。

2 碲化物及自然金的矿物产状与成分特征

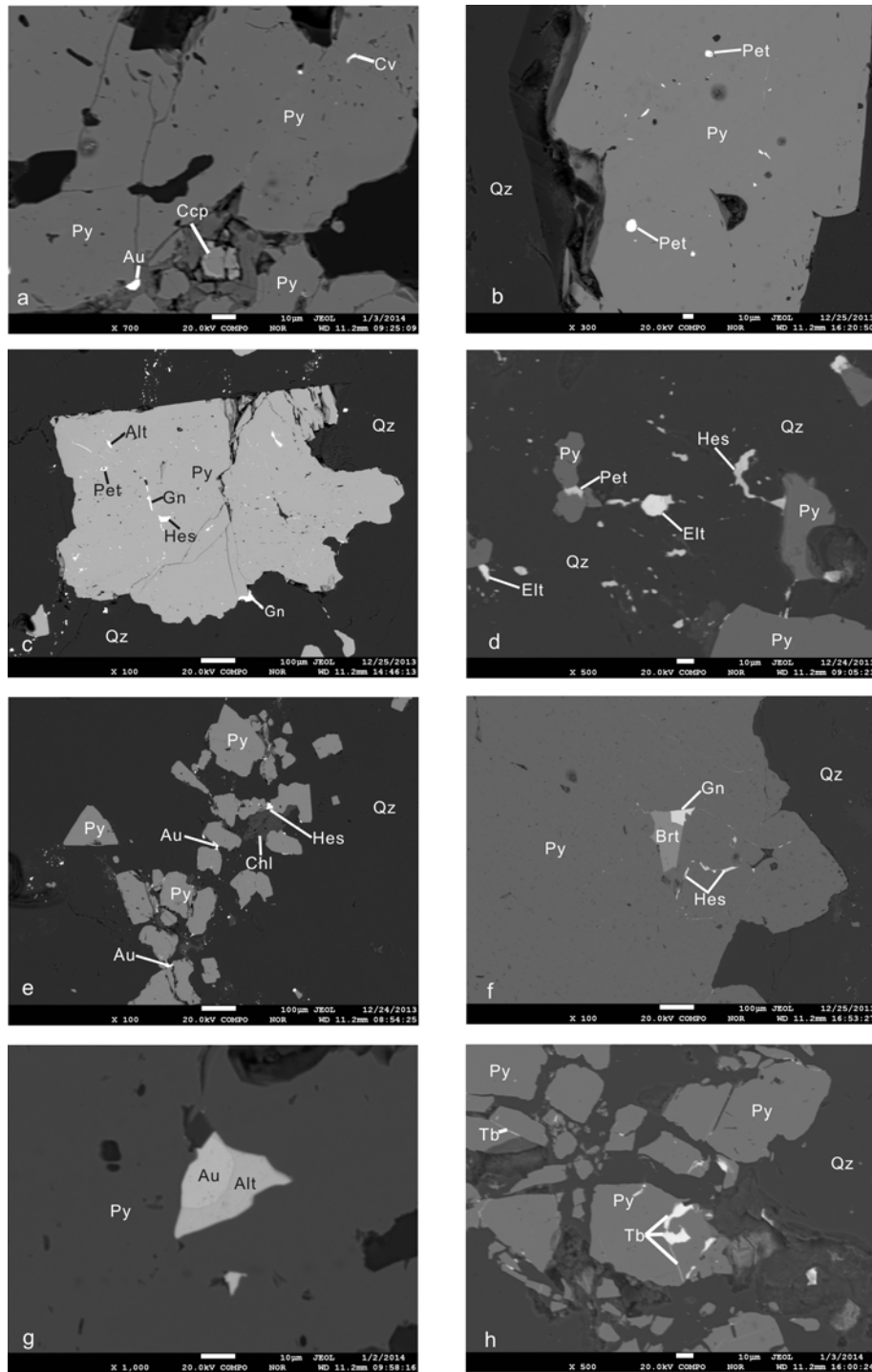
2.1 分析方法

本次研究综合利用电子探针二次电子图像、背散射图像、能谱分析(EDS)等方法,对党河南山某金矿矿石中碲化物的共生关系与赋存状态进行了研究,并利用波谱分析(WDS)对碲化物及其伴生的其他矿物成分进行了定量分析测试。电子探针分析工作在中国地质调查局西安地质调查中心实验测试中心完成,仪器型号为 JXA-8230,检测条件如下:加速电压:20 kV,束流: 1×10^{-8} (A),束斑直径: $1 \mu\text{m}$,检出角: 40° ,校正:ZAF,温度: 25°C ,湿度:30%。全部样品分 2 次检测,第一次检测的样品编号以 # 标识,第二次检测的样品编号以“*”标识。

2.2 碲化物矿物产状与成分特征

碲金矿:本次研究仅检测到一处碲金矿,呈不规则状包裹于他形黄铁矿之中(图 1a),表明其与黄铁矿同期形成。该碲金矿大小约 $2 \mu\text{m}$,电子探针成分分析显示其 Te 含量为 58.93%,Au 含量为 39.4%,银含量为 0.97%,并含微量 Se、Cu、Zn、Mo、Bi(表 1),计算出其化学式为 $\text{Au}_{0.29}\text{Te}_{0.68}$ 。

碲金银矿:研究区金矿矿石中发现了较多的碲金银矿,其产出形式有 4 种:①呈乳滴状、细小透镜状包裹于半自形黄铁矿中,无共生、伴生碲化物矿物(图 1b)。②呈不规则状包裹于半自形黄铁矿中,该黄铁矿中同时包裹碲铅矿、方铅矿、碲银矿,但上述矿物均呈独立颗粒产出,互不接触(图 1c)。③呈粒状、蠕虫状包裹于自形黄铁矿中,该黄铁矿同时包裹金银矿。④碲金银矿呈独立颗粒状产于黄铁矿粒间,



a. 碲金矿包裹于黄铁矿中; b. 碲金银矿包裹于黄铁矿中; c. 碲铅矿、碲金银矿、碲银矿、方铅矿包裹于黄铁矿中; d. 碲银矿、银金矿包裹于石英中; e. 碲银矿、含银自然金产于石英、黄铁矿粒间; f. 碲银矿、方铅矿伴生于黄铁矿裂隙; g. 碲铅矿、自然金共生黄铁矿中; h. 碲铋矿产于黄铁矿裂隙。矿物缩写: Cv. 碲金矿; Pet. 碲金银矿; 碲银矿—Hes; Alt. 碲铅矿; Tb. 碲铋矿; Py. 矿铁矿; Ccp. 黄铜矿; Gn. 方铅矿; Au. 金; Elt. 银金矿; Qz. 石英; Chl. 绿泥石

图1 碲化物产状及共生关系图(电子探针背散射图像)

Fig. 1 Occurrence and paragenetic relationship of telluride mineral and pyrite (electron microprobe backscattering image)

空间上与包裹于石英中的银金矿、碲银矿密切伴生(图 1d)。电子探针成分分析显示碲金银矿中 Te 含量在 33.39%~35.72%,平均值为 34.09%,Au 含量在 21.20%~28.55%,平均值为 24.32%,Ag 含量在 34.69%~42.70%,平均值为 39.52%;另外,还含有微量的 Fe、S、Pb、Zn、Se、Co 等元素(表 1)。根据电子探针分析结果的平均值,其计算化学式为 $\text{Ag}_{0.48}\text{Au}_{0.16}\text{Te}_{0.35}$ 。

表 1 碲化物主要元素 Au、Ag、Te 的含量表(%)
Tab. 1 The contents of Au, Ag, Te in uranium bearing mineral and the age results(%)

原始样品编号	Au	Ag	Te	Pb	Bi	Total	计算化学式	矿物名称
39 [#]	39.4	0.97	58.93	0	0.24	100	$\text{Au}_{0.29}\text{Te}_{0.68}$	碲金矿
4 [#]	21.2	42.7	35.72	0.01	—	100.92	$\text{Ag}_{0.49}\text{Au}_{0.13}\text{Te}_{0.35}$	碲金银矿
9 [#]	23.9	39.74	33.59	0	—	99.02	$\text{Ag}_{0.48}\text{Au}_{0.15}\text{Te}_{0.33}$	碲金银矿
2 [*]	24.17	39.04	33.87	0	—	98.73	$\text{Ag}_{0.46}\text{Au}_{0.16}\text{Te}_{0.34}$	碲金银矿
7 [*]	23.8	41.45	33.39	0	—	101.56	$\text{Ag}_{0.46}\text{Au}_{0.16}\text{Te}_{0.32}$	碲金银矿
8 [*]	28.55	34.69	33.9	0	—	100.21	$\text{Ag}_{0.41}\text{Au}_{0.18}\text{Te}_{0.34}$	碲金银矿
1 [#]	1.84	58.52	38.24	0.07	—	100.05	$\text{Ag}_{0.62}\text{Te}_{0.34}$	碲银矿
8 [#]	0.04	60.73	38.23	0.12	—	100.17	$\text{Ag}_{0.64}\text{Te}_{0.34}$	碲银矿
12 [*]	3.31	57.15	38.07	0	—	100.14	$\text{Ag}_{0.60}\text{Te}_{0.34}$	碲银矿
11 [#]	0	0.18	38.24	60.92	—	101.08	$\text{Pb}_{0.47}\text{Te}_{0.48}$	碲铅矿
18 [#]	0	0	37.6	60.37	0	99.96	$\text{Pb}_{0.47}\text{Te}_{0.47}$	碲铅矿
25 [#]	0	0	36.8	57.5	0	99.18	$\text{Pb}_{0.42}\text{Te}_{0.43}$	碲铅矿
6 [*]	0	0.51	35.31	57.21	—	101.18	$\text{Pb}_{0.37}\text{Te}_{0.37}$	碲铅矿
48 [#]	0	0.02	47.66	0	52.25	100.58	$\text{Bi}_{0.40}\text{Te}_{0.59}$	碲铋矿
50 [#]	0	0.02	47.23	0	53.09	101.01	$\text{Bi}_{0.40}\text{Te}_{0.59}$	碲铋矿

注:39[#]碲金矿因其面积与厚度均小于 1 μm ,被电子束击穿基底的黄铁矿与碲金矿周围黄铁矿被检测而导致误差,而不检测 Fe、S 元素总和仅为 79.86%,故使用的是归一化后 100%的数据。

碲银矿:碲银矿主要的产状有 4 种:①呈蠕虫状、不规则状包裹于石英中,与银金矿、碲金银矿密切伴生(图 1d)。②呈独立粒状产于黄铁矿与石英粒间,空间上与银金矿伴生(图 1e)。③产于黄铁矿裂隙中,空间上与方铅矿密切伴生(图 1f)。④呈粒状包裹于黄铁矿中,与银金矿共生或与碲金银矿、碲铅矿、方铅矿密切伴生(图 1c);电子探针成分分析显示碲银矿中 Te 含量在 38.07%~38.24%,平均值为 38.18%,Ag 含量在 57.15%~60.73%,平均值为 58.8%,Au 含量在 0.04%~3.31%,平均值为 1.73%(表 1);此外,也含有微量 Fe、S、Se、Zn、Pb、Co 等元素。根据电子探针分析结果的平均值,其计算化学式为 $\text{Ag}_{0.64}\text{Te}_{0.35}$ 。

碲铅矿:碲铅矿具有 2 种产状:①呈不规则状与乳滴状自然金共生,包裹于他形黄铁矿中(图 1g)。②呈蠕虫状包裹于黄铁矿中,与碲金银矿、碲银矿、

方铅矿密切伴生,但互不接触(图 1c)。③包裹于黄铁矿中,空间上与自然金伴生。电子探针成分分析显示碲铅矿 Te 含量在 35.31%~38.24%,平均值为 36.99%,Pb 含量在 57.21%~60.92%,平均值为 59%;另外,还检测出了微量 Fe、S、Se、Zn、Ag、Co、Ni、W 等元素,但未检测出 Au,表明 Au 与 Pb 具有不相容性。根据电子探针分析结果的平均值,其计算化学式为 $\text{Pb}_{0.45}\text{Te}_{0.46}$ 。

碲铋矿:碲铋矿具有 2 种产状:①呈脉状独立矿物产于黄铁矿裂隙中(图 1h)。②呈独立粒状包裹于黄铁矿中,空间上与自然金伴生。电子探针成分分析显示碲铋矿 Te 含量在 47.23%~47.66%,平均值为 47.45%,Bi 含量在 52.25%~53.09%,平均值为 52.67%;还检测出了微量的 Fe、Se、Zn、Ag、Co、Ni、W。根据电子探针分析结果的平均值,其计算化学式为 $\text{Bi}_{0.40}\text{Te}_{0.59}$ 。

2.3 自然金的矿物产状与成分特征

研究区金矿中金矿物主要以自然金产出,并含有少量含银自然金和银金矿,包括4种产状:①呈独立矿物产于黄铁矿、石英粒间(图1a,图1e)。②呈不规则状、乳滴状包裹于黄铁矿中(图1g)。③呈脉状独立矿物产于黄铁矿裂隙中。④呈乳滴状包裹于石英中(图1d)。电子探针成分分析显示金矿物中Au含量介于81.06%~95.21%,Ag含量介于3.41~16.32%,金成色较高,达到806~946。

3 讨论

3.1 碲化物矿物形成顺序

通过以上观察与分析可以得出,研究区金矿中碲化物、金矿物多单独产出,无连生、交生现象,但在空间上均紧密伴生;仅见少量碲铅矿与自然金、碲银矿与银金矿共生现象。该系列矿物均与黄铁矿关系密切,多产于黄铁矿内部、裂隙、粒间或被黄铁矿附近的石英包裹,形态多样,都比较细小,大小约在 $1 \times 1.5 \mu\text{m} \sim 10 \times 15 \mu\text{m}$ 。本次研究根据碲化物与黄铁矿之间不同的共生组合关系,推测矿物的形成顺序为碲金矿→碲金银矿→碲铅矿→碲铋矿→碲银矿。主要依据为碲金矿包裹于黄铁矿中;碲金银矿主要包裹于黄铁矿中,少数产于黄铁矿粒间;碲铅矿均包裹于黄铁矿中;碲铋矿存在黄铁矿包裹与黄铁矿裂隙2种产状;碲银矿存在黄铁矿包裹、石英包

裹、黄铁石英粒间和黄铁矿裂隙4种产状;碲化物赋存方式总趋势为从黄铁矿包裹→黄铁矿粒间→石英包裹→黄铁矿裂隙,但各碲化物的生成时间会相互叠置;黄铁矿始终与碲化物及共生,有逐渐减少的趋势,这与黄铁矿具有较大的硫逸度稳定范围一致。

自然金、含银自然金、银金矿有黄铁矿包裹、石英包裹、黄铁石英粒间和黄铁矿裂隙4种产状。其中含银自然金、银金矿多与碲银矿、碲金银矿伴生被黄铁矿或石英包裹,自然金多单独产出且多为粒间金或裂隙金。反映随着碲化物的沉淀,金的成色逐渐升高。

3.2 碲化物矿物化学成分变化规律

研究区金矿中Te化物电子探针矿物成分显示,金银碲化物中碲金银矿与碲银矿中Te含量变化不大,而Au含量与Ag含量变化互为消长关系(图2a),说明金银碲化物中金与银互为类质同象替代;将金银碲化物的电子探针数据投影到Au-Ag-Te三元体系矿物共生图解上(图3),可以看出金银碲化物投点均比较靠近标准矿物端点,说明碲化物是在较为稳定的平衡条件下沉淀形成的。Pb在碲金银矿与碲金矿中为微量或不含,在碲银矿中含量升高,但与碲银矿中金含量具有线性负相关(图2b),说明Pb与Au的相关性较差。研究区碲化物中均存在S、Fe,并且含量普遍较其他微量元素高,推测可能与碲化物和黄铁矿密切共生有关,S、Fe作为类质同象进入碲化物而替代Te、Ag、Au、Pb、Bi。

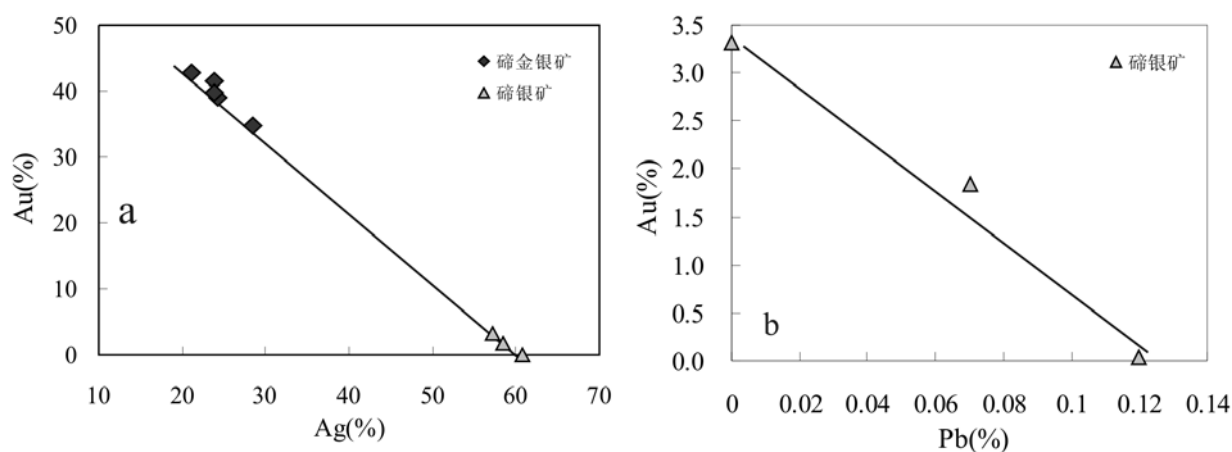


图2 金银碲化物矿物中Au-Ag与Au-Pb关系图

Fig. 2 Au-Ag and Au-Pb diagrams of gold-silver telluride minerals

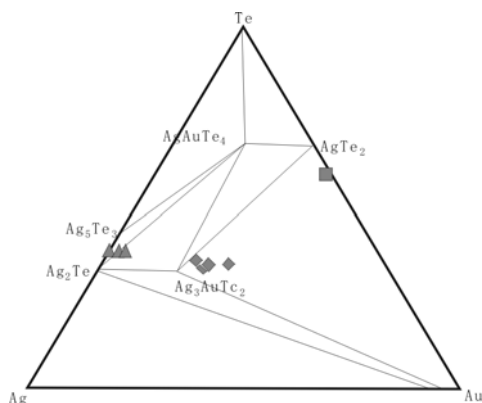


图3 Au-Ag-Te体系相图(底图据 Markham, 1960; Cabri, 1965)

Fig. 3 The Au-Ag-Te ternary system and its mineral paragenesis(after Markham, 1960; Cabri, 1965).

3.3 碲化物形成时的碲逸度和硫逸度

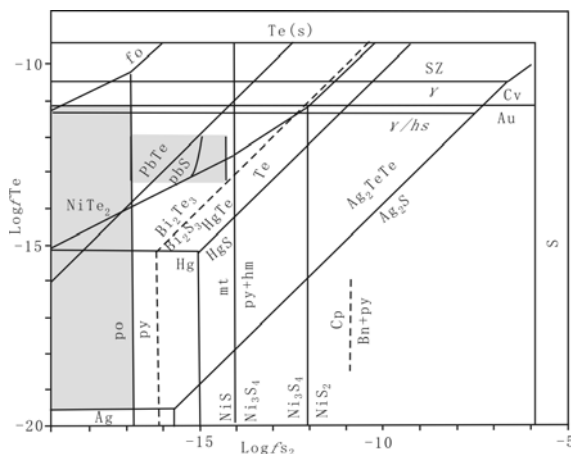
f_{Te_2} 、 f_{S_2} 与温度对碲化物的形成起到了至关重要的作用,在一定温度条件下,高的 f_{Te_2} ,高的 $f_{\text{Te}_2}/f_{\text{S}_2}$ 值对形成碲化物有利,在相同的 f_{Te_2} 条件下,低温对形成碲化物有利(张招崇等,1997)。因此,研究区金矿床中碲化物的形成应受温度、 f_{Te_2} 、 f_{S_2} 的共同影响。

前人研究认为研究区金矿床为中低温热液型金矿(王宝华,2013),但是由于研究程度较低没有详细确切的成矿温度资料。陈翠华等(1999)通过统计全球金-碲化物型矿床的成矿温度,发现碲化物形成温度多为120~350℃,张招崇和李兆鼎(1994)研究认为碲化物形成温度均较低,一般为110~240℃,为中-低温。因此,可以根据碲化物确定研究区金矿床成矿温度也应属中低温范畴。

研究区成矿流体的硫逸度(f_{S_2})和碲逸度(f_{Te_2})变化范围可以采用 Afifi et al. (1988a)编制的200℃条件下的 $\lg f_{\text{S}_2}$ - $\lg f_{\text{Te}_2}$ 图解来确定。由于研究区金矿中碲化物生成阶段未出现磁黄铁矿但出现黄铜矿,表明该阶段的成矿流体中 $\lg f_{\text{S}_2}$ 应大于-16.7;碲金矿少量出现指示了成矿流体碲逸度应位于自然金与碲金矿平衡反应线之上,最高 $\lg f_{\text{Te}_2}$ 应大于-11.2;矿物组合中出现碲金银矿、碲银矿、碲铅矿、方铅矿、碲铋矿但未出现辉铋矿,表明成矿

反应中 $\lg f_{\text{S}_2}$ 、 $\lg f_{\text{Te}_2}$ 应位于碲铋矿与辉铋矿平衡反应线之上, $\lg f_{\text{Te}_2}$ 应大于-15.2。

通过以上分析可以得出研究区金矿碲化物沉淀时期的 $\lg f_{\text{Te}_2}$ 与 $\lg f_{\text{S}_2}$ 处于图4所示的多边形范围内, $\lg f_{\text{Te}_2}$ 为-15.2~>-11.2, $\lg f_{\text{S}_2}$ 为-16.7~-14.4。根据矿物生成顺序判断硫逸度与碲逸度均逐渐减小(图4)。Barton 和 Skinner 1979年通过实验得出银金矿中的银与碲的化合反应可以用来反演反应体系中的 f_{Te_2} (Afifi et al., 1988b), Afifi et al. (1988b)将这一方法应用于实际地质研究,提出的可利用碲银矿、银金矿共生矿物计算矿床沉淀时成矿流体中的 f_{Te_2} ,其公式如下: $\lg f_{\text{Te}_2} = (1/4.576T)\{-50197 + 16.32T - 18.302T \log X_{\text{Ag}} + 4(1 - X_{\text{Ag}})^2[5650 - 1600(1 - X_{\text{Ag}}) - 1.375T]\}$,其中 X_{Ag} 为Ag在Au-Ag固溶液中的原子百分比, T 为温度(K)。通过上公式计算得到研究区金矿中200℃时 $\lg f_{\text{Te}_2}$ 为-13.48,与 $\lg f_{\text{S}_2}$ - $\lg f_{\text{Te}_2}$ 图解得出的 $\lg f_{\text{Te}_2}$ 范围较为一致。由此可以确定研究区金矿中碲化物沉淀时具有较高的碲逸度和较低的硫逸度。



阴影区为本区硫化物形成时的 Te_2 - S_2 逸度范围

图4 200℃条件下不同金属元素的碲化物-硫化物的 f_{Te_2} - f_{S_2} 图解(据 Afifi et al., 1988a)

Fig. 4 The stabilities of some sulfides and tellurides as function of the fugacities of S_2 and Te_2 at 200℃ (After Afifi et al., 1988a)
The shadow region shows the condition of telluride minerals formation

3.4 金、碲的物质来源

通过研究,认为 Te 元素为亲地幔地核元素,高 Te 含量是源岩中含有幔源组分的标志(陈光远等,1993;杜乐天等,1996)。例如,四川大水沟独立碲矿床中 Te 元素被认为来自超基性-基性火成岩。值得关注的是分散元素 Te 的地球化学性质受其电子构型和地质地球化学作用制约,在不同的物理化学条件下会表现出不同的地球化学特征。例如,在高温时高度分散,具亲氧性,而在中、低温条件下富集成矿,表现出亲 S 性(钱汉东等,2000)。

研究区斜长花岗岩体为金矿的控矿岩体,具高 Sr、低 Yb、高 Na、低 K、弱 Eu 正异常(李厚民等,2003;刘志武等,2007;范俊杰等,2008),具 O 型埃达克岩特征(王方成等,2011)。大量研究证实,埃达克岩与斑岩型和浅成低温热液型铜金矿床具有密切的时空和成因联系(张旗等,2008;孙卫东等,2010)。O 型埃达克岩的源岩多为板块俯冲带玄武质洋壳熔融的产物(Defant,2002),而玄武岩质洋壳在俯冲消减之前通常会发生海水蚀变作用,将 H_2O 、Cl 等挥发分及 Fe_2O_3 等氧化物带入俯冲地幔楔,在俯冲带约 40~50 km 熔融形成具高氧逸度、富 Cl 挥发分埃达克质岩浆,穿过地幔楔和地壳到达浅部(张旗等,2008)。大量的实验表明,高温高压下 Au 和 Cu 以 Cl 的稳定络合物形式迁移(张招崇等,1997;张旗等,2008);高氧逸度条件下,硫化物是不稳定的,从而使亲 S 元素 Au、Cu 会类似于不相容元素在熔体中富集(张旗等,2008)。由于 Te 元素在高温时具有亲氧性,随着高氧逸度岩浆形成并穿过地幔楔,会使亲地幔元素 Te 逐渐富集于熔体之中。

研究区斜长花岗岩 Au 含量为 41.4×10^{-9} (李厚民等,2003),围岩长石岩屑砂岩 Au 含量为 $15 \times 10^{-9} \sim 100 \times 10^{-9}$ (王宝华,2013),均远远大于地壳 Au 丰度值。但是,由于研究区金矿围岩蚀变较弱,推测斜长花岗岩岩体提供了成矿 Au、Te 来源,围岩可能也提供了部分成矿物质。

4 结论

(1)研究区金矿中发现的碲化物包括碲金矿、碲

金银矿、碲银矿、碲铅矿、碲铋矿,矿物颗粒均比较小,赋存状态与黄铁矿关系密切,初步推断碲化物的形成顺序为碲金矿→碲金银矿→碲铅矿→碲铋矿→碲银矿。

(2)研究区金矿中碲化物沉淀时具有较高的碲逸度和较低的硫逸度, $\lg fTe_2$ 范围为 $-15.2 \sim >-11.2$, $\lg fS_2$ 范围为 $-16.7 \sim -14.4$,随着碲化物不断形成,碲逸度逐渐降低。

(3)研究区金矿中 Au、Te 元素来源与埃达克质斜长花岗岩体有较大联系,可能为俯冲板片部分熔融形成的埃达克质岩浆与地幔楔相互作用,将成矿元素富集后带入近地表形成含碲化物的金矿床。

参考文献(References):

- 陈翠华,曹志敏,侯秀萍,等.全球金-碲化物型矿床的分布规律和主要成矿条件[J].成都理工学院学报,1999,26(3):34-41.
- CHEN Cuihua, CAO Zhimin, HOU XiuPing, et al. The distributive law and main minerogenic conditions of gold telluride deposits in the world[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1999, 26(3): 241-248.
- 陈光远,孙岱生,周珣若,等.胶东郭家岭花岗岩闪长岩成因矿物学与金矿化[M].北京:中国地质大学出版社,1993:84.
- CHEN Guangyuan, SUN Daisheng, ZHOU Xunruo, et al. Genetic mineralogy and gold mineralization of Guojialing granodiorite in Jiaodong Region[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1993: 84.
- 杜乐天,刘若新,邓晋福.地幔流体与软流层(体)地球化学[M].北京:地质出版社,1996:456-457.
- DU Letian, LIU Ruoxin, DENG Jinfu. Geochemistry of Mantle Fluids and Asthenosphere(Asthenoliths)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 456-457.
- 范俊杰,路彦明,丛润祥,等.祁连山西段党河南山北坡3个不同特征的金矿床研究[J].地质找矿论丛,2008,23(1):48-53.

- FAN Junjie, LU Yanming, CONG Runxiang, et al. Study on 3 gold deposits varied in characteristics at the north slope of the Danghe nanshan mountain in the west Qilian mountains[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2008, 23(1): 48-53.
- 贾群子, 杨钟堂, 肖朝阳, 等. 祁连成矿带成矿区划和找矿潜力[J]. 西北地质, 2002a, 35(4): 86-100.
- JIA Qunzi, YANG Zhongtang, XIAO Chaoyang, et al. Subdivision of Qilian metallogenic belt and its prospecting potentiality[J]. Northwestern Geology, 2002a, 35(4): 86-100.
- 贾群子, 杨钟堂, 肖朝阳, 等. 祁连山金属矿床成矿带划分及分布规律[J]. 矿床地质, 2002b, (S1): 140-143.
- JIA Qunzi, YANG Zhongtang, XIAO Chaoyang et al. Subdivision of Qilian Metallogenic Belt and Ore-forming Regularities [J]. Mineral Deposits, 2002b, (S1): 140-143.
- 李汉光, 肖力, 张学军, 等. 党河南山地区东西向构造带及其控岩控矿作用[J]. 黄金, 2007, 28(12): 12-16.
- LI Hanguang, XIAO Li, ZHANG Xuejun, et al. EW structure belt and function of controlling diagenesis and mineralization in Danghenanshan district[J]. Gold, 2007, 28(12): 12-16.
- 李厚民, 王崇礼, 刘志武, 等. 南祁连党河南山北坡两个不同特征的金矿床[J]. 矿床地质, 2003, 22(2): 191-198.
- LI Houmin, WANG Chongli, LIU Zhiwu, et al. Two Different Kinds of Gold Deposits on Northern Slope of Danghenanshan Area in South Qilian Mountains[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(2): 191-198.
- 刘家军, 翟德高, 刘新会, 等. 金矿床中硒、碲超常富集研究现状[J]. 矿物学报, 2011, (S1): 267-269.
- LIU Jiajun, ZHAI Deigao, LIU Xinhui, et al. The research status of super-richening of selenium tellurium in gold ore [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, (S1): 267-269.
- 刘志武, 王崇礼. 南祁连党河南山花岗岩类地球化学及其金铜矿化[J]. 地质与勘探, 2007, 43(1): 64-73.
- LIU Zhiwu, WANG Chongli. Granitoid geochemistry and gold-copper mineralization in the Danghenanshan area, southern Qilian mountains[J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(1): 64-73.
- 钱汉东, 陈武, 谢家东, 等. 碲矿物综述[J]. 高校地质学报, 2000, 6(2): 178-187.
- QIAN Handong, CHEN Wu, XIE Jiadong, et al. A review of tellurium minerals[J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6(2): 178-187.
- 孙卫东, 凌明星, 杨晓勇, 等. 洋脊俯冲与斑岩铜金矿成矿[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(2): 127-137.
- SUN Weidong, LING Mingxing, YANG Xiaoyong, et al. Ridge subduction and porphyry copper gold mineralization: An overview[J]. Sci. China Earth Sci., 2010, 40(2): 127-137.
- 涂光炽. 初论碲的成矿问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(4): 211-214.
- TU Guangchi. The preliminary study of the mechanism of tellurium deposits[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2000, 19(4): 211-214.
- 王宝华. 甘肃党河南山贾台金矿成矿模式探讨[J]. 甘肃地质, 2013, 22(2): 50-55.
- WANG Baohua. Geological characteristics of Jiagongtai gold deposit in Subei county of Gansu province[J]. Gansu Geology, 2013, 22(2): 50-55.
- 王方成, 汪双双, 李泰德, 等. 祁连山花岗岩分类及找矿方向初探[J]. 岩石学报, 2011, 27(12): 3823-3830.
- WANG Fangcheng, WANG Shuangshuang, LI Taide, et al. Initial discussion on classification of granites and prospecting direction in the Qilianshan area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(12): 3823-3830.
- 许虹, 余宇星, 吴祥珂, 等. 黑龙江三道湾子金矿 Au-Ag-Te 矿物共生结构对成矿条件的指示[J]. 科学通报, 2012, 57(23): 2200-2210.
- XU Hong, YU Yuxing, WU Xiangke, et al. Intergrowth Texture in Au-Ag-Te Minerals from Sandaowanzi Gold

- Deposit, Heilongjiang Province, Implications for Ore-forming Environment [J]. Chin. Sci. Bull, 2012, 57 (23): 2200-2210.
- 许振纲. 党河南山一带金矿成矿规律与找矿模式研究方法和思路[J]. 甘肃科技, 2010, 26(22): 34-37.
- XU Zhengang. The methods and ideas of gold metallogenic law and prospecting model of DangHe nanshan area[J]. Gansu Science and Technology, 2010, 26(22): 34-37.
- 张佩华, 赵振华, 包志伟, 等. 碲成矿机制研究新进展[J]. 地质科技情报, 2000, 19(2): 55-58.
- ZHANG Peihua, ZHAO Zhenhua, BAO Zhiwei, et al. New advances in studies of tellurium metallogenesis[J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19 (2): 55-58.
- 张旗, 王焰, 熊小林, 等. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 45-137.
- ZHANG Qi, WANG Yan, XIONG Xiaolin, et al. Adakite and granite: a challenge and opportunity[M]. Beijing: China Publishing House, 2008: 45-137.
- 张招崇, 李兆鼎. 一个值得重视的金矿类型—碲化物型 [J]. 贵金属地质, 1994, 3(1): 59-64.
- ZHANG Zhaochong, LI Zhaonai. A type of important gold deposit: Tellerides[J]. Journal of Precious Metallic Geology, 1994, 3(1): 59-64.
- 张招崇, 李兆鼎. 富碲化物型金矿形成的物理化学条件——以水泉沟金矿田为例[J]. 矿床地质, 1997, 16 (1): 42-53.
- ZHANG Zhaochong, LI Zhaonai. Physicochemical conditions for the formation of tellurides-rich gold deposits as exemplified by the Shuiquangou gold orefield[J]. Mineral Deposits, 1997, 16(1): 42-53.
- 周起凤, 李胜荣, 陈海燕, 等. 胶东乳山英格庄金矿碲化物的发现及其意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1847-1856.
- ZHOU Qifeng, LI Shengrong, CHEN Haiyan, et al. Discovery and geological significance of telluride minerals in the Yinggezhuang gold deposit, Rushan, Jiaodong[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1847-1856.
- AFIFI A M, KELLY W C, ESSENE E J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides II. Applications to telluride-bearing ore-deposits [J]. Economic Geology, 1988a, 83(2): 395-404.
- AFIFI A M, KELLY W C, ESSENE E J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides I. Thermochemical data and calculated equilibria[J]. Economic Geology, 1988b, 83(2): 377-394.
- CABRI L J. Phase relations in the Au-Ag-Te systems and their mineralogical significance[J]. Economic Geology, 1965, 60(8): 1569-1606.
- CRISTIANA L C, NIGEL J C, Allan Pring. Bismuth tellurides as gold scavengers[A]. J. W. Mao and F. P. Bierlein, eds. In: Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge [C]. Berlin-Heidelberg-New York: Springer, 2005: 1383-1386.
- DEFANG M J, XU J F, KEPEZHINSKAS P, et al. Adakites: some variations on a theme[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(2): 129-142.
- MARKHAM N L. SYNTHETIC and natural phases in the system Au-Ag-Te[J]. Economic Geology, 1960, 55 (6): 1148-1178.