

文章编号: 0254 - 5357(2015)06 - 0643 - 09

DOI: 10. 15898/j. cnki. 11 - 2131/td. 2015. 06. 007

高分辨扫描电镜和 X 射线能谱 Mapping 技术研究碲矿物的成分和形态特征

胡勇平¹, 于学峰², 郑林伟¹, 郑遗凡^{3*}

(1. 浙江省地质矿产研究所, 浙江 杭州 310005; 2. 山东省地质科学研究所, 山东 济南 250013;

3. 浙江工业大学化学工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: X 射线能谱元素像分析技术(EDS - Mapping)可直接观察岩石光片中目标元素的分布特征。本文采用高分辨扫描电镜及配置的 X 射线能谱仪综合分析技术,对山东归来庄金矿中碲元素和其他元素的分布特征和组合规律进行研究,定性确定含碲矿物、形态特征及其与其他矿物间的空间关系。结果表明,研究区金矿中含碲矿物有棱角状碲金银矿、碲化铅等,以浸染状形貌他形镶嵌于主矿物他形石英和片状云母之间,颗粒大小从几微米到几百微米极不均匀。对典型含碲矿物的微区成分进一步精确测定,得到碲金银矿和碲化铅的化学式为 $Ag_{0.85}Au_{2.55}Te_6$ 和 $Pb_{0.52}Te_{0.48}$,其中碲金银矿成分明显异常。本文研究为稀散分布微细矿物的成分、形态分布及与围岩关系建立了一套先进实用的表征方法,可为含碲金矿的综合利用提供技术支持。

关键词: 碲矿物; 形态特征; 扫描电镜; X 射线能谱 Mapping 技术

中图分类号: P578.15; P575.2; P575.5 **文献标识码:** A

碲矿在自然界中独立成矿很少,大部分以碲化物如碲金矿、针碲金银矿等形式存在于金矿中。金矿中的碲化物常以微细矿物分散赋存,是碲矿的主要类型之一,含碲金矿的综合利用研究工作在国内外均有开展^[1-7],但目前尚处于较低水平,碲尚无有效的回收措施,大多作尾矿处理。由于碲和金、银元素具有较相似的化学性质,在自然界中常发生类质同象替代而生成非整比系列过渡相产物,矿石中金、银、碲形成非常复杂的赋存状态^[8-14],前人研究主要集中在含碲金矿中碲化物的地球化学特征、矿物学特征及成矿机理等方面^[15-21],而对含碲矿物的化学组成、元素赋存规律研究较少^[21],导致现代金矿中碲化物大多作为尾矿处理而没有获得有效的回收。

为了解决上述问题,需要对含碲矿物开展微区分析,此类分析不只限于微观形貌和结构,还要求与对应的化学组分之间的关联进行研究,获得材料微区内微观形貌、结构和成分的综合信息^[22-23]。电子

显微镜及配置的 X 射线能谱仪(EDS - Mapping)就是获取这类综合信息的表征方法之一^[24-25]。随着电子显微镜空间分辨率和 X 射线能谱仪能量分辨率及信号强度的提高,在纳米级别进行元素的面分布分析已经在材料研究领域得到了越来越多的应用^[26-28],尤其在高分辨透射电镜(HRTEM)中采用的高角环形暗场探头(HAADAF)进行扫描透射(STEM)分析,结合高性能的 X 射线能谱仪可在原子级别进行元素像分析。X 射线能谱像元素面分布(EDS - Mapping)分析由于具有直观、快速灵活、高分辨等特点,在岩石、微细矿物研究方面具有较大的优越性,该技术应用于研究颗粒较小的贵重金属矿物的赋存状态展示出巨大的应用前景^[29],已在国外有了较多的尝试^[30-31],而在我国岩矿分析领域的应用起步较晚。本文利用高分辨扫描电镜(HRSEM)和 X 射线能谱的元素面分布(EDS - Mapping)综合分析技术^[22-28],对山东归来庄金矿中含碲矿物的成分、形态分布及与围岩关系进行研究,建立了一套岩

收稿日期: 2015 - 08 - 19; 修回日期: 2015 - 10 - 22; 接受日期: 2015 - 11 - 09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372086); 中国地质大调查项目(12120113015100); 国土资源部黏土矿物重点实验室开放课题(2014 - K4)

作者简介: 胡勇平,教授级高级工程师,从事岩矿分析和应用研究。E-mail: dzkeyjs@aliyun.com。

通讯作者: 郑遗凡,教授,矿物及材料表征和应用研究。E-mail: zhengyifan@zjut.edu.cn。

矿中微细矿物赋存状态的研究方法,可为后期选矿工艺提供技术支持。

1 地质背景

山东归来庄金矿田位于滨西太平洋成矿域中部,地处华北板块东南缘,郯庐断裂带以西,鲁西地块南部,尼山凸起与平邑凹陷的接壤地带^[32]。归来庄金矿田断裂构造发育,NNW向的主干断裂及次级NW向断裂控制了地层及岩浆岩的展布,地层以古元古代花岗闪长岩及古元古代二长花岗岩与新太古界泰山岩群共同构成了该区的结晶基底。中生代燕山早期构造-岩浆活动强烈,形成了主要由二长闪长质岩石、二长正长质岩石构成的铜石次火山杂岩体。同时形成了次火山岩浆热液有关的隐爆角砾岩型、镁质碳酸盐岩微细浸染型等多种类型金矿^[33-34]。NNW向的燕甘断裂是区内主要的导岩导矿构造,而近EW向和NW向断裂为燕甘断裂的派生次级构造,是矿田内的主要导矿和容矿构造,以归来庄F1断裂为代表,出露长度2200 m,宽度变化较大,一般为5~15 m,最窄处仅0.5 m,最宽处30 m左右,倾斜延深超过650 m。沿走向及倾向均呈舒缓波状,总体走向85°,倾向S,倾角45°~68°,为一张扭性正断层。归来庄断裂受区域应力及次火山穹窿的叠加作用,表现出先压后张的活动特点,在后期张性活动过程中隐爆角砾岩贯入其中,并伴有强烈的热液蚀变及金矿化,形成矿体。

2 样品采集和分析方法

2.1 样品采集与制备

山东省平邑县归来庄金矿是国内外罕见的含硒碲矿物的富金矿。矿田内各类型金矿属与碱性潜火山岩浆期后浅成低温热液有关的石英-萤石-冰长石-绢云母型富碲金矿。本文在矿区中采集了代表性矿石样品5个,编号为GL-11、GL-31、GL-33、GL-52和GL-62,进行系统的化学成分分析及碲含量测定。在前期岩石薄片和光片鉴定基础上,又选择了有代表性的隐爆角砾岩样品2个,编号为ZH-b1和ZJ-3,制成岩石光片,经表面喷碳处理增强导电性,直接对光片进行高分辨扫描电镜和X射线能谱等各项分析。

2.2 样品微观形貌和成分表征

样品形貌分析:测量仪器为场发射扫描电镜(Hitachi S-4700型,日本日立公司),测量条件为:加速电压15 kV,工作距离12 mm。

微区X射线能谱定量分析及元素面分布(EDS-Mapping)分析:测量仪器为X射线能谱仪(Thermo NORAN Vantage-ESI型,美国Thermo公司),测量条件为:工作电压15 kV,工作距离12 mm。

岩石主成分元素分析:测量仪器为波长色散型X射线荧光光谱仪(Axios X型,荷兰PNAlytical仪器公司)。

含量低的目标元素碲的分析:测量仪器为双道原子荧光光度计(AFS-3000型,北京海光仪器有限公司)。

岩石主成分物相分析:采用X射线衍射仪(X'PertPRO型,荷兰PNAlytical仪器公司),测量条件为Cu K α 射线($\lambda = 0.154056$ nm),工作电压40 kV,工作电流40 mA,扫描范围 $2\theta = 10^\circ \sim 80^\circ$,扫描步进 $0.0167^\circ/\text{s}$ 。分析软件采用Jade 6.0,数据库采用PDF2-2004。

3 结果与讨论

3.1 矿石的化学成分和矿物成分

归来庄金矿区根据岩矿鉴定结果均以隐爆角砾岩为主^[20-21],本文在富矿区采集有代表性样品5个,其中主要成分和微量元素碲的系统分析结果见表1。从分析结果可看出,样品中主成分仍然是Si、Al、K、Ca、Fe,目标元素碲的含量除GL-31和GL-62外均很高,最高达到 $66.1 \mu\text{g/g}$ (样品GL-52)。

选择其中GL-11样品进行X射线衍射分析,通过物相定性分析后得到结果见图1。从图1中看出该引爆角砾岩的主要矿物成分还是石英和正长石,次要成分为云母、赤铁矿,除了这4种主要造岩矿物外还含有少量萤石和方解石,系后期低温热液成因,充填在缝隙中。

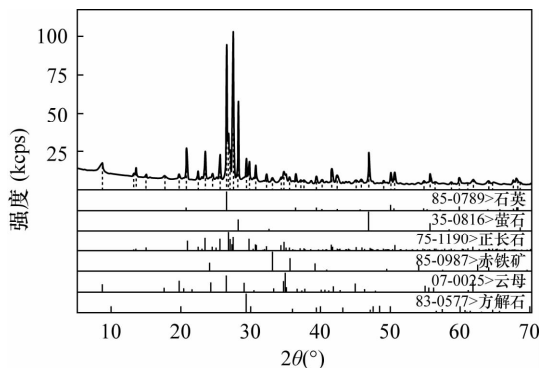


图1 GL-11样品X射线衍射物相分析图谱

Fig. 1 Phase identification of GL-11 sample using X-ray diffraction technique

表 1 归来庄金矿中矿石的主要成分和碲元素含量

Table 1 The main composition and the content of Te in the Guilaizhuang gold deposit

样品 编号	元素含量(%)									Te 含量 ($\mu\text{g/g}$)	烧失量 (%)
	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	SiO_2	SO_3	TiO_2		
GL-11	14.96	6.64	2.34	9.84	0.20	0.26	58.53	0.086	0.24	26.6	4.41
GL-31	14.32	9.50	3.27	11.20	2.04	0.29	46.84	1.42	0.26	0.62	10.69
GL-33	13.78	11.23	2.34	10.84	2.46	0.26	45.84	0.054	0.25	26.1	12.32
GL-52	21.62	0.16	5.70	4.20	0.27	0.035	60.54	0.094	0.40	66.1	5.37
GL-62	16.73	2.94	1.12	12.58	0.14	0.36	61.22	0.24	0.21	1.61	2.26

3.2 碲元素像分析及含碲矿物形貌特征

归来庄金矿在前期研究中对于含碲矿物的赋存状态分析主要有光学显微镜和电子探针的资料^[29]。由于该矿区碲化物成分复杂,类质同像现象普遍,矿物种类很多,同时矿石中还有较多的黄铁矿和闪锌矿等其他金属类化合物,因此仅靠光片鉴定或岩石薄片鉴定方法来区分含碲矿物种类有较大的难度,并容易出错。同时由于光学显微镜的分辨率局限性,对于微米级细小碲化物(含量较多)的观察有很大局限性^[20]。文献中还有应用电子探针来研究含碲矿物的成分和赋存状态,但由于该方法的分辨率有限,直接观察的方便性也较差,因此也有其局限性。用扫描电镜背散射图像分析研究矿物赋存状态对于普遍存在元素替代现象的矿物之间界限的观察很不理想^[35],且不能显示成分信息。

本文尝试用分辨率高的扫描电子显微镜结合微区 X 射线能谱的元素面扫描功能,直接观察碲元素的分布规律及其与其他元素之间的空间关系,通过元素的组合分析直接得到含碲矿物的种类、形貌特征及其与其他矿物之间的相互关系。图 2 为 ZJ-3 样品某特征区域的形貌和碲元素分布图,图 2a 为岩石扫描电镜(SEM)形貌图,亮色部分反射率较高颗

粒为金属类矿物。总体上来看,选区的金属类矿物形状完全不规则,大小差异很大。为了清晰地直接观察含碲矿物的分布特征,本文对碲元素进行元素面分布扫描,如图 2b 所示。图中选择的是碲元素 L 线的元素分布图,其亮度代表碲元素的丰度,蓝色越亮代表碲含量越高。从图中亮度差别来看,含碲类矿物有多种亮度,大类可归属纯蓝色和深蓝色 2 种,它们相互镶嵌呈浸染状他形分布于主矿物之间。在不同倍数下对含碲矿物的尺寸进行大致测量统计,含碲矿物从几微米到几百微米大跨度连续分布,其中以二十几微米大小颗粒数量最多。

3.3 含碲矿物组分、赋存状态及主要围岩

为了系统研究归来庄金矿区含碲矿物的种类、形貌特征及其与其他矿物的空间关系,建立一套岩石中矿物组分、分布及形貌特征分析方法,本文用高分辨扫描电镜及 X 射线能谱仪对典型光片样品 ZH-b1 中含碲矿物及共生矿物元素进行定性和定量分析,根据元素组合特征和各元素的摩尔比得到碲化物及其他矿物的化学式^[36-37],推断出含碲矿物的种类、赋存状态及其与围岩矿物之间的关系^[3-4,38]。

首先用扫描电镜选择有代表性含碲矿物区域,用 X 射线能谱分析(EDS)检测目标区域的总化学

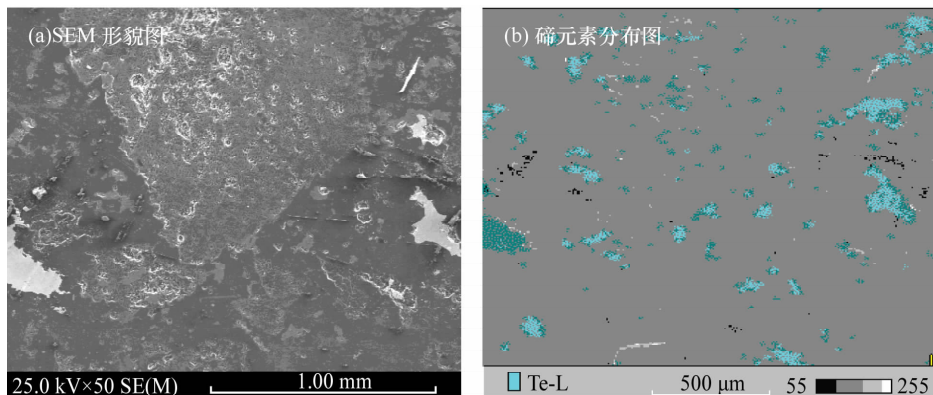


图 2 ZJ-3 样品中某典型区域含碲矿物形貌及碲元素分布图

Fig. 2 Morphology image and distribution of Te in a typical region of ZJ-3 sample (a—SEM image; b—Distribution of Te)

成分,确定其所含的化学元素主要有 Si、O、Al、Te、Au、Ag。根据分析结果对其主要元素 Si、O、Al、Te、Au、Ag 进行元素面分布(EDS - Mapping)分析,得到该区元素分布及丰度如图3所示。图3左上角为扫描电镜(SEM)形貌图,分析图中元素组合规律特征可分为2组:一组由 Te、Au、Ag 组合而成,呈岛状星点分布,标示 a 区域,与 SEM 图中亮色部分一致;另一组由 Si 和 O 港湾状分布,标示 b 区域,与 SEM 图中暗色部分一致。对图3a 和 b 区域微区成分进行 X 射线能谱分析,确定了其中的元素含量示于图3下部。根据 a 区各元素摩尔比可得到其化学式大致

为 $Ag_{0.85}Au_{2.55}Te_6$,判断为碲金银矿^[39-40],而 b 区基本为石英,所以该区域含碲矿物主要由大小不均的岛状碲金银矿分布在石英脉中。

根据以上分析方法,本研究在 ZH - b1 样品中找到另一种矿物组合的其他区域进行含碲矿物及其围岩矿物形貌及分布分析。根据分析结果对其中主要成分 O、Si、Al、K、Te、Pb、S、Zn 进行面分布(EDS - Mapping)分析,得到该区域的元素分布及丰度如图4所示。图4左上角为扫描电镜(SEM)形貌图,根据图中元素组合规律排布可将分为4组:第一组由 Te、Pb 组合而成,由棱角状多边颗粒连接而成,与

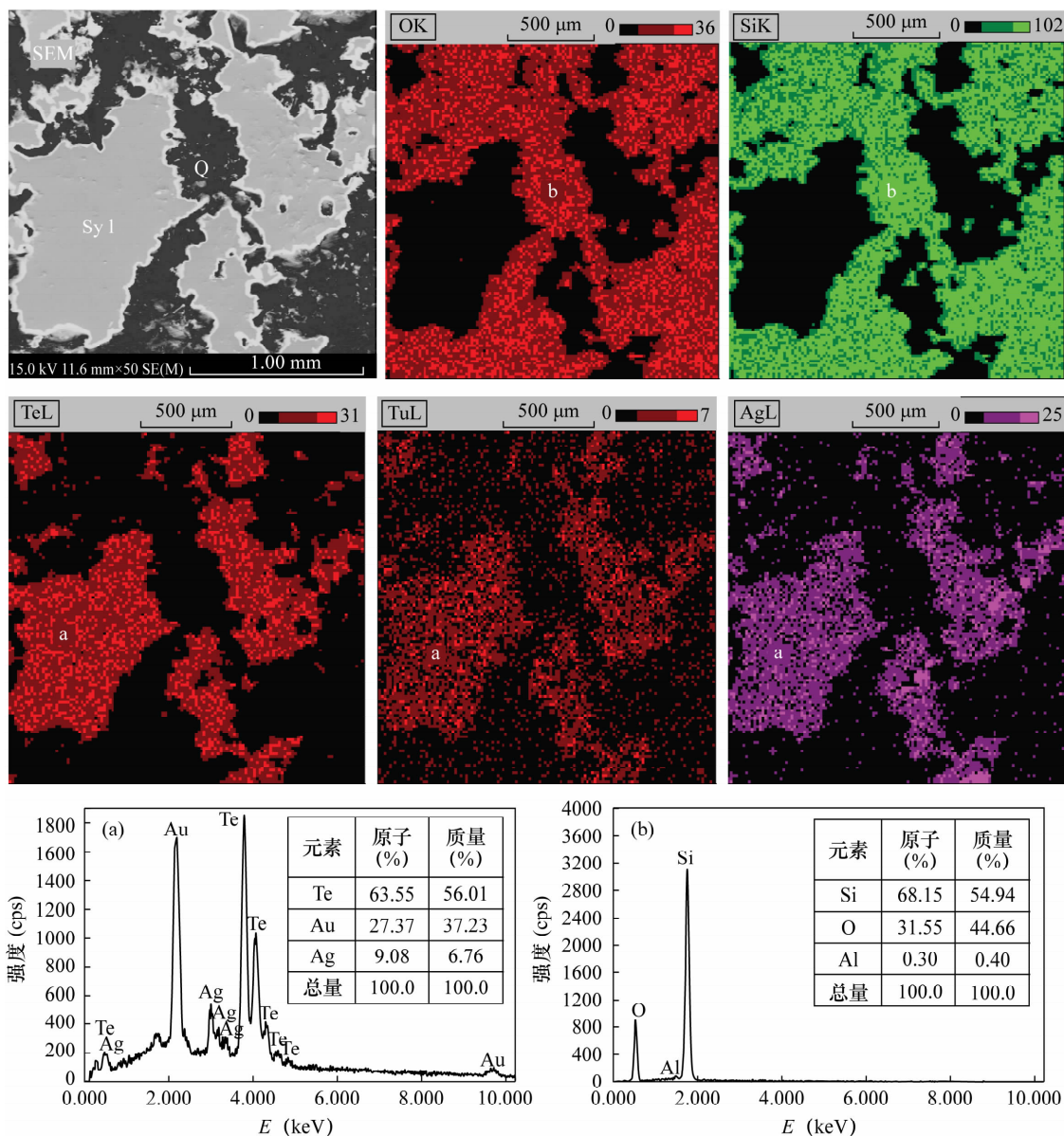


图3 ZH - b1 样品中某一区域 SEM 形貌图、元素分布和微区(a)、(b) X 射线能谱分析结果

Fig.3 The SEM morphology image, element distributions and analytical results of EDS for area (a) and (b) in one region of ZH - b1 sample

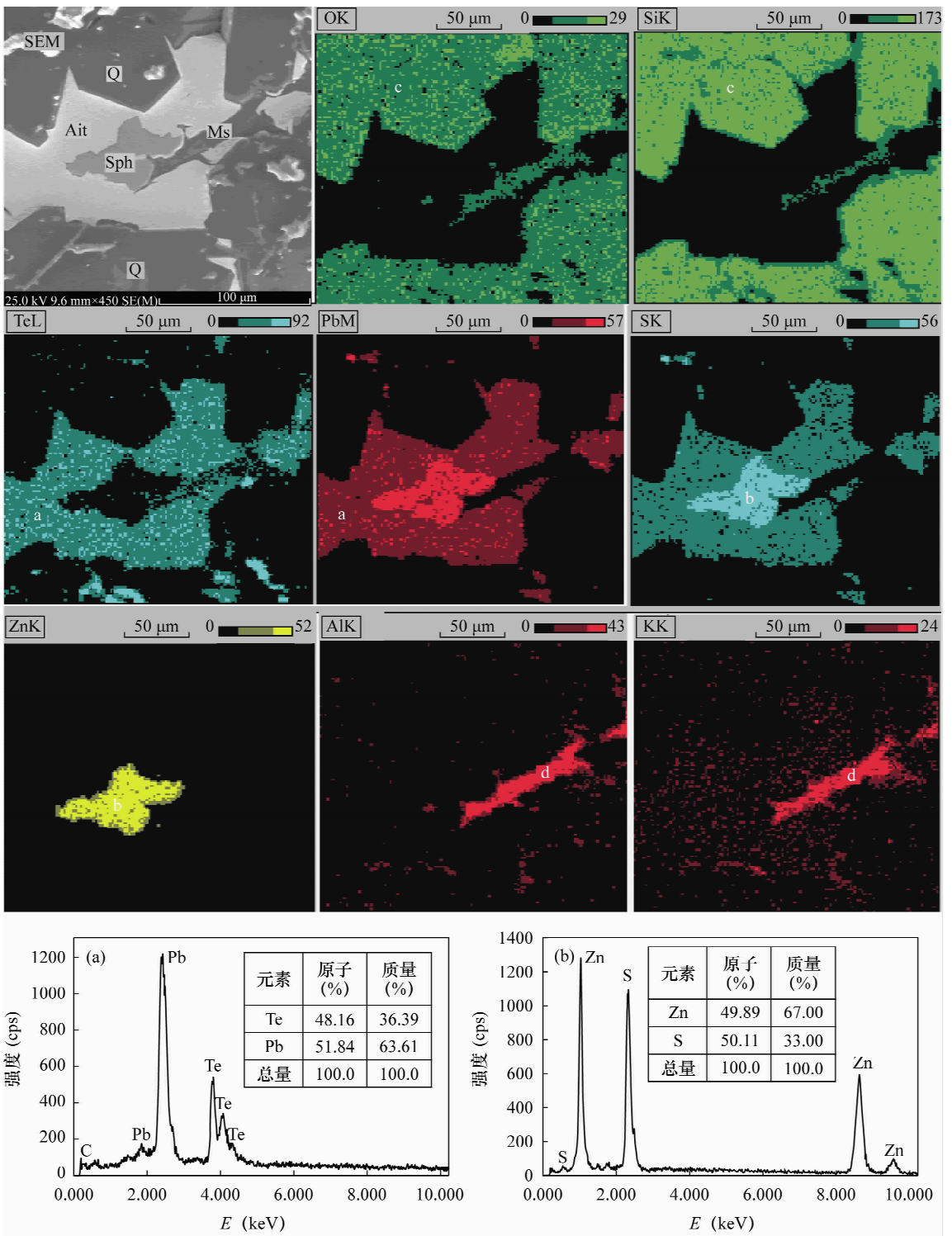


图 4 ZH-b1 样品中另一区域 SEM 形貌图、元素分布和微区(a)、(b)X 射线能谱分析结果

Fig. 4 The SEM morphology image, element distributions and analytical results of EDS for area (a) and (b) in the other region of ZH-b1 sample

SEM 中灰度最亮区域 Ait 一致, 标示 a 区; 第二组分布在 a 区中间近菱形颗粒组成, 成分为 Zn 和 S, 与 SEM 中灰度次亮区 Sph 一致, 标记 b 区; 第三组为基体相 Si 和 O 元素组成, 与 SEM 中灰度暗色区域

Q 一致, 标记为 c 区; 第四组为长条片状矿物形貌, 标记 Ms, 元素以 K、Al、Si、O 为主, 灰度与 c 区相似, 根据元素分布特征判定, 标记为 d 区。

为了精确测定各区元素含量, 分别对图 4 的 a

和 b 区进行微区 X 射线能谱分析,得到图谱和分析结果见图 4 下部。从图 4 可以看出,a 区成分 Pb 和 Te 原子比为 51.84 : 48.16,Pb 和 Te 原子比接近于 1 : 1,推测其化学式为 $Pb_{0.52}Te_{0.48}$,即常见的碲化铅矿物 Ait。b 区成分 Zn 和 S 原子比为 49.89 : 50.11,基本接近于 1 : 1,为闪锌矿的分子式一致,标记为 Sph,两种矿物实测原子比与矿物理论分子式基本一致,计算结果可靠。c 区和 d 区根据计算结果和 X 射线衍射分析结果(图 1)判断分别为石英 Q 和云母 Ms,其中 d 区的云母片状结构非常明显。

4 结论

应用高分辨扫描电镜结合高分辨 X 射线能谱仪,采用能谱仪元素像分析技术(EDS - Mapping)和微区成分分析综合分析技术对山东归来庄金矿中含碲矿物的形貌特征和空间分布规律进行研究,得到金矿中含碲矿物分布以浸染状形貌他形镶嵌于主矿物之间,颗粒大小从几微米到几百微米极不均匀。通过对代表性样品 ZH - b1 中 2 个典型区域中碲元素和其他元素的分布和组合规律研究,确定含碲矿物为棱角状针碲金银矿和碲化铅,围岩矿物则主要以他形石英和片状云母为主,还有少量伴生的菱形闪锌矿,进一步对针碲金银矿和碲化铅微区化学成分进行精确测定,获得化学式分别为 $Ag_{0.85}Au_{2.55}Te_6$ 和 $Pb_{0.52}Te_{0.48}$ 。以上研究成果对含碲金矿中碲化物的综合开发利用提供了指导。

本研究通过实例建立了一套用高分辨扫描电镜形貌、X 射线能谱仪元素像(EDS - Mapping)和微区 X 射线能谱成分分析相结合的综合分析技术,这些技术的应用为研究矿石中任何一种目标矿物尤其是稀散布微细矿物的元素分布、组合规律及其与围岩关系提供了一套操作简单、结果可靠的分析方法。

致谢:在样品采集和基础资料搜集过程中,得到了山东黄金归来庄矿业公司和山东省地质科学研究院李大鹏等技术人员的大力支持,在此表示感谢。

5 参考文献

[1] 戴婕,徐金沙,杜谷,等.利用扫描电镜 - 电子探针研究四川杨柳坪铜镍硫化物矿床铂钯的赋存状态及沉淀机制[J].岩矿测试,2015,34(3):161 - 168.
Dai J,Xu J S,Du G,et al. Analysis of the Occurrence of Platinum-Palladium and Precipitation Mechanism by

SEM and EPMA in the Ni-Cu Sulphide Deposits from Yangliupin, Sichuan Province, China [J]. Rock and Mineral Analysis,2015,34(3):161 - 168.

- [2] Masataka N, Kosei K. Chemistry and Occurrences of Native Tellurium from Epithermal Gold Deposits in Japan [J]. Resource Geology,2011,61(3):211 - 223.
- [3] 聂铁苗,牛福生,刘淑贤,等.应用 X 射线衍射 - 扫描电镜 - 光学显微镜鉴定黑龙江石墨尾矿中的绢云母 [J]. 岩矿测试,2015,34(2):194 - 200.
Niu Y M,Niu F S,Liu S X,et al. Identification of Sericite in Graphite Tailing of Heilongjiang Province by X-ray Diffraction, Scanning Electron Microscopy and Optical Microscope [J]. Rock and Mineral Analysis, 2015, 34 (2):194 - 200.
- [4] Chris M, Michele D, Piercey N, et al. Tellurite-, Tellurate-, and Selenite Based Anaerobic Respiration by Strain CM 3 Isolated from Gold Mine Tailings [J]. Extremophiles,2015,19:1013 - 1019.
- [5] 王子玉,郭海军.我国黄金矿产资源综合利用现状与发展趋势[J].黑龙江冶金,2014,34(2):61 - 62.
Wang Z Y,Guo H J. Current Situation and Development Trend of Comprehensive Utilization of Gold Mineral Resources in China [J]. Heilongjiang Metallurgy,2014, 34(2):61 - 62.
- [6] 郭勋英,曹芳杰,阙永航.金矿尾矿的开发与利用——以山东招远界河金矿床为例[J].西部探矿工程[J].2014(5):133 - 140.
Guo X Y,Cao F J,Que Y H. Development and Utilization of Gold Tailings Zhaoyuan Jiehe Gold Deposit—Taking Shandong as an Example [J]. West-China Exploration Engineering,2014(5):133 - 140.
- [7] Liu R,Huang F,Du R X,et al. Recycling and Utilisation of Industrial Solid Waste: An Explorative Study on Gold Deposit Tailings of Ductile Shear Zone Type in China [J]. Waste Management & Research,2015,33(6):570 - 577.
- [8] Alfieris D, Voudouris P, Spry P G. Shallow Submarine Epithermal Pb-Zn-Cu-Au-Ag-Te Mineralization on Western Milos Island, Aegean Volcanic Arc, Greece: Mineralogical, Geological and Geochemical Constraints [J]. Ore Geology Reviews,2013,53:159 - 180.
- [9] Panagiotis C V, Vasilios M, Paul G S, et al. Mineralogy and Geochemical Environment of formation of the Perama Hill High-sulfidation Epithermal Au-Ag-Te-Se Deposit, Petrotta Graben, NE Greece [J]. Mineralogy and Petrology,2011,103:79 - 100.
- [10] Zhai D G, Liu J J. Gold-Telluride-Sulfide Association in the Sandaowanzi Epithermal Au-Ag-Te Deposit, NE China: Implications for Phase Equilibrium and

- Physicochemical Conditions [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2014, 108(6): 853–871.
- [11] 余宇星, 许虹, 吴祥, 等. 黑龙江三道湾子金矿 Au–Ag–Te 系列矿物特征及其成矿流体[J]. *岩石学报*, 2012, 28(1): 345–356.
- Yu Y X, Xu H, Wu X, et al. Characteristics of the Au–Ag–Te Minerals and Its Ore-forming Fluids in Sandaowanzi Gold Deposit, Heilongjiang Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(1): 345–356.
- [12] Xu W G, Fan H R, Hu F F, et al. Gold Mineralization in the Guilaizhuang Deposit, Southwestern Shandong Province, China: Insights from Phase Relations among Sulfides, Tellurides, Selenides and Oxides [J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 56: 276–291.
- [13] 刘新会, 冯明伸, 刘家军, 等. 西秦岭寨上特大型金矿床碲化物与金矿物共生关系研究[J]. *黄金科学技术*, 2011, 19(4): 6–12.
- Liu X H, Feng M S, Liu J J, et al. Reserch on the Paragenetic Relationship between Tellurium and Gold Minerals in Zhaishang Gold Deposit, West Qinling [J]. *Gold Science and Technology*, 2011, 19(4): 6–12.
- [14] Andreas G M, Janet R M. Silver-rich Telluride Mineralization at Mount Charlotte and Au–Ag Zonation in the Giant Golden Mile Deposit, Kalgoorlie, Western Australia [J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48: 295–311.
- [15] 胡文瑄, 孙国曦, 张文兰, 等. 山东乳山金矿中金–银碲化物的矿物学特征与沉淀机理[J]. *矿物学报*, 2005, 25(2): 177–182.
- Hu W X, Sun G X, Zhang W L, et al. Au–Ag Telluride Minerals and Their Precipitation Mechanism in the Rushan Gold Deposit, Shandong [J]. *Acta Mineralogy Sinica*, 2005, 25(2): 177–182.
- [16] 谷湘平, Watanabe M, 谢先德, 等. 陈国达矿 ($\text{Ag}_9\text{FeTe}_2\text{S}_4$): 胶东地区金矿床中发现的硫碲化物新矿物[J]. *科学通报*, 2008, 53(17): 2064–2070.
- Gu X P, Watanabe M, Xie X D, et al. Chen Guoda Mine ($\text{Ag}_9\text{FeTe}_2\text{S}_4$): A New Mineral Sulfur Telluride Found Gold Deposit in Eastern Shandong, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(17): 2064–2070.
- [17] 刘建朝, 李旭芬, 刘亚非, 等. 胶东牟平—乳山金矿带金青顶金矿碲化物矿物的特征及沉淀机制[J]. *地质通报*, 2010, 29(9): 1319–1328.
- Liu J C, Li X F, Liu Y F, et al. Mineralogical Characteristics of Telluride and Their Precipitation Mechanism in the Jinqingding Gold Deposit, Eastern Shandong [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(9): 1319–1328.
- [18] 韩思宇, 翟德高, 刘家军, 等. 黑龙江三道湾子碲金矿床物质组成及成因意义[J]. *矿床地质*, 2011, 30(5): 855–866.
- Han S Y, Zhai D G, Liu J J, et al. Mineral Assemblage of Sandaowanzi Tellurium Gold Deposit in Heilongjiang Province and Its Genetic Significance [J]. *Mineral Deposit*, 2011, 30(5): 855–866.
- [19] 游国庆, 刘淑琴, 潘家华. 太平洋富钴结壳中碲元素的地球化学特征及其富集机制探讨[J]. *矿床地质*, 2014, 33(1): 223–232.
- You G Q, Liu S Q, Pan J H. Geochemical Characteristics and Enrichment Mechanism of Tellurium in Co-rich Crusts from Pacific Ocean [J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(1): 223–232.
- [20] Gao H, Xu H, Zhang D S, et al. Ore Petrography and Chemistry of the Tellurides from the Dongping Gold Deposit, Hebei Province, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 64: 23–34.
- [21] 钱汉东, 陈武, 谢家东, 等. 我国某些金矿床中金银碲化物矿物的共生关系[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(2): 220–224.
- Qian H D, Chen W, Xie J D, et al. Mineralogical Paragenetic Relationships of Au–Ag Tellurides in Some Gold Deposits of China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2000, 6(2): 220–224.
- [22] Chen L, Srinivasan L, Zhou J M, et al. Characterization of Microstructure and Mechanical Properties of High Chromium Cast Irons Using SEM and Nanoindentation [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24: 98–105.
- [23] Vladimir U, Inna P, Nandakishore S, et al. X-ray Diffraction and SEM Study of Kidney Stones in Israel: Quantitative Analysis, Crystallite Size Determination, and Statistical Characterization [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2011, 33: 613–622.
- [24] Huang H, Li C, Cheng C, et al. Application of Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis: FE-SEM, ESEM-EDS, and EDS Mapping for Studying the Characteristics of Topographical Microstructure and Elemental Mapping of Human Cardiac Calcified Deposition [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2014, 406: 359–366.
- [25] Arizio E, Orsega E F, Sommariva G, et al. Tin Amalgam Mirrors: Investigation by XRF, SEM-EDS, XRD and EPMA-WDS Mapping [J]. *Applied Physics A*, 2013, 111(3): 733–745.
- [26] Lu P, Zhou L, Kramer M J, et al. Atomic-scale Chemical Imaging and Quantification of Metallic Alloy Structures by Energy-dispersive X-ray Spectroscopy [R]. *Scientific*

- Reports,2014,DOI:10.1038:1-5.
- [27] Michael S T, Alessandro M, Viswanathan G B, et al. High Resolution Energy Dispersive Spectroscopy Mapping of Planar Defects in L12-containing Co-base Superalloys [J]. *Acta Materialia*, 2015, 89:423-437.
- [28] Lu P, Romero E, Lee S, et al. Chemical Quantification of Atomic-scale EDS Maps under Thin Specimen Conditions [J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2014, 20: 1782-1790.
- [29] 刘亚非, 赵慧博, 高志文, 等. 应用偏光显微镜和电子探针技术研究安徽铜官山矽卡岩型铜铁矿床伴生元素金银铂钨钼的赋存状态 [J]. *岩矿测试*, 2015, 34(2):187-193.
- Liu Y F, Zhao H B, Gao Z W, et al. Study on the Occurrence of Associated Metals Au, Ag, Pt, Pd, U in Tongguanshan Skarn Type Copper-Iron Deposit of Anhui Province Using Microscope and Electron Microprobe [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2015, 34(2):187-193.
- [30] Michael C M, Peter A, Peter T. Quantitative Evaluation of Mineral Grains Using Automated SEM-EDS Analysis and Its Application Potential in Optically Stimulated Luminescence Dating [J]. *Radiation Measurements*, 2013, 58:1-11.
- [31] Moreno-Tovar R, Terrés E R, Rangel-Mendez J. Oxidation and EDX Elemental Mapping Characterization of an Ordered Mesoporous Carbon: Pb(II) and Cd(II) Removal [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 303:373-380.
- [32] 谢家东, 钱汉东, 李永徽. 山东省平邑归来庄碲型金矿床碲元素地球化学特征及成矿机制探讨 [J]. *地质找矿论丛*, 2000, 15(2):133-141.
- Xie J D, Qian H D, Li Y H. Geochemical Characteristics of Tellurium and Minerogenic Mechanism of the Guilaizhang Tellurium-type Gold Deposit, Shandong Province [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2000, 15(2):133-141.
- [33] 于学峰, 方宝明, 韩作振. 鲁西归来庄金矿田成矿系列及成矿作用研究 [J]. *地质学报*, 2009, 83(1):55-64.
- Yu X F, Fang B M, Han Z Z. Study on Ore Forming Series and Mineralization of the Guilaizhang Gold Field in Western Shandong [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(1):55-64.
- [34] 于学峰. 山东平邑归来庄矿田金矿成矿作用成矿规律与找矿方向研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2010.
- Yu X F. Study on Gold Mineralization Ore-forming Rules and Prospecting Direction of Guilaizhang Gold Mine in Pingyi County in Shandong Province [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010.
- [35] Xu H, Yu Y X, Wu X K, et al. Intergrowth Texture in Au-Ag-Te Minerals from Sandaowanzi Gold Deposit, Heilongjiang Province: Implications for Ore-forming Environment [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 157(21):2778-2786.
- [36] Matthew R B, Ian T S, Raymond E S. Liquid-phase Synthesis of Uniform Cube-shaped GeTe Microcrystals [J]. *Chemistry of Materials*, 2010, 22(10):3236-3240.
- [37] Anderson M E, Bharadwaja S S N, Schaak R E. Modified Polyol Synthesis of Bulk-scale Nanostructured Bismuth Antimony Telluride [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, 20:8362-8367.
- [38] Dale E N, Nicholas W M R. Elemental Mapping of Microstructures by Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Spectrometry (SEM-EDS): Extraordinary Advances with the Silicon Drift Detector (SDD) [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2013, 28(7):973-988.
- [39] Bi S J, Li J W, Zhou M F, et al. Gold Distribution in As-deficient Pyrite and Telluride Mineralogy of the Yangzhaiyu Gold Deposit, Xiaoqinling District, Southern North China Craton [J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46:925-941.
- [40] 罗镇宽, 关康, 王曼祉, 等. 中国某些金矿床中碲化物的特征 [J]. *黄金地质*, 1999, 5(3):69-74.
- Luo Z K, Guan K, Wang M Z, et al. The Features of Tellurite in Some Gold Deposits, China [J]. *Gold Geology*, 1999, 5(3):69-74.

Application of High-resolution Scanning Electron Microscope and X-ray Energy Dispersive Spectroscopy Mapping Technique to Study the Composition and Morphology of Tellurium Minerals

HU Yong-ping¹, YU Xue-feng², ZHENG Lin-wei¹, ZHENG Yi-fan^{3*}

(1. Institute of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province, Hangzhou 310005, China;

2. Institute of Geological Scientific Research of Shandong Province, Jinan 250013, China;

3. School of Chemical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The X-ray Energy Dispersive Spectrometry EDS-Mapping technique can be used to directly observe distribution characteristic of elements in rock sections. The distribution characteristics and elemental assemblage of tellurium (Te) and some other elements (Au and Ag) from the Guilaizhuang gold field in Shandong Province of China were investigated by high resolution Scanning Electron Microscope (SEM) and X-ray Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) Mapping techniques and are presented in this paper. The morphological characteristics of possible Te minerals, as well as the spatial relationship between Te minerals and other minerals, were also qualitatively determined. The results show that the Te-bearing minerals in the Zhuojiazhuang gold deposit include angular sylvanite and altaite, which were disseminated in the space between anhedral quartz and sheet muscovite. The Te-bearing minerals have particle sizes ranging from a few to hundreds of micrometers. Microanalysis of the Te-bearing minerals indicates that the chemical formulae of sylvanite and altaite are $\text{Ag}_{0.85}\text{Au}_{2.55}\text{Te}_6$ and $\text{Pb}_{0.52}\text{Te}_{0.48}$, respectively. Sylvanite has an abnormal chemical composition. Through the study, an advanced and practical technique for analyzing the composition and the morphological characteristics of Te minerals and their relationship with wallrock was developed. This study also provides technique support for comprehensive utilization of Te-bearing gold minerals.

Key words: telluride; morphological characteristics; Scanning Electron Microscope; X-ray Energy Dispersive Spectroscopy Mapping technique