

甘肃厂坝铅锌矿床黄铁矿流体包裹体 He-Ar 同位素体系

焦学尧^{1,2} 樊小龙^{1,2} 余平辉^{1,2} 蒋国豪³ 熊文勃^{1,2} 成志雁^{1,2} 马锦龙^{1,2*}

- 1.兰州大学地质科学与矿产资源学院,甘肃 兰州 730000;
- 2.甘肃省西部矿产资源重点实验室,甘肃 兰州 730000;
- 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 550081

摘要 稀有气体是一种研究成矿古流体来源的灵敏示踪剂,其同位素组成对揭示成矿流体来源、成因和演化等信息意义重大。甘肃厂坝铅锌矿成矿流体来源方面的研究至今仍存争议,本研究通过对该矿床黄铁矿流体包裹体 He-Ar 同位素组成特征的分析,结合研究区具体的矿床地质背景,对其成矿流体来源进行了探讨。主要结果表明: $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 0.0137~0.0758 Ra,说明成矿流体具有壳源特征, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值的平均比值为 438.78,高于大气饱和水的 Ar 同位素特征值($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=295.5$),说明成流体中有壳源放射性成因的 ^{40}Ar 加入;成矿流体中相对低的 $^{40}\text{Ar}^*(\%)$ 值和 $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$ 比值,表明大气饱和水曾参与了成矿作用,且有部分成矿流体捕获了围岩中高放射成因的 ^4He 。上述结果从稀有气体同位素角度为厂坝铅锌矿成矿流体来源提供了证据,说明厂坝铅锌矿成矿流体是泥盆纪喷流沉积作用和印支—燕山早期构造改造成矿作用的综合产物。

关键词 厂坝铅锌矿;氦氩同位素;成矿流体;来源

中图分类号 P597 文献标志码 A 文章编号 1005-2518(2016)04-0047-07 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2016.04.047
引文格式 JIAO Xueyao, FAN Xiaolong, YU Pinghui, et al. He-Ar Isotopic System of Fluid Inclusions in Pyrite from the Changba Lead-Zinc Deposit in Gansu Province[J]. Gold Science and Technology, 2016, 24(4): 47-53. 焦学尧, 樊小龙, 余平辉, 等. 厂坝铅锌矿床黄铁矿流体包裹体 He-Ar 同位素体系[J]. 黄金科学技术, 2016, 24(4): 47-53.

稀有气体是一种研究成矿古流体来源的灵敏示踪剂,包括 He、Ne、Ar、Kr、Xe 及 Rn,以化学性质不活泼和在地球中含量稀少为特征^[1-2]。因为化学惰性,稀有气体难以与其他物质发生化学反应而通常呈单质存在,但天然核过程和物理过程——特别是不同源区的混合可以改变其同位素丰度和组成,从而为解决成矿流体来源、矿床受混染情况及分析对比不同构造环境等提供了依据。对矿床中稀有气体的研究是现代地学研究的热点领域之一,其同位素组成对揭示成矿流体来源、成因和演化等信息意义重大。此外,矿物中的流体包裹体通常具有良好的密闭性,是保存原始成矿流体最理想的代表^[3]。

通过对流体包裹体中的物质组分进行定性及定量分析可以获得成矿流体的各方面信息,如温度、压力、流体性质等,从而查明成矿过程中流体的行为和作用,解释成矿过程及条件^[4-5]。

对厂坝铅锌矿的研究一直受到人们的关注,其成矿流体的来源及演化至今存有争议,现存的主要观点有:其成矿流体主要为喷流热液与海水的混合流体^[6-9],该矿床受到后期变质热液的改造^[10];岩浆作用对成矿起到重要影响^[11-12]。本文通过对厂坝铅锌矿黄铁矿流体包裹体 He-Ar 同位素组成特征的分析,结合研究区具体的矿床地质背景,对其成矿流体来源进行了探讨。

收稿日期 2016-06-30 修订日期 2016-07-28

基金项目 国家自然科学基金项目“甘肃文县阳山金矿中稀有气体同位素及其与流体主要组分的多元综合示踪”(编号 41173014)资助

作者简介 焦学尧(1987-)男,甘肃靖远人,硕士研究生,从事矿物学、岩石学和矿床学研究工作。jiaoxy15@lzu.edu.cn

*通讯作者:马锦龙(1971-)男,甘肃武都人,副教授,从事地球化学研究工作。mjinlong@lzu.edu.cn

1 矿床地质背景

厂坝铅锌矿床位于秦岭造山带西段的西成盆地内,大地构造上属于秦岭褶皱系西秦岭华力西褶皱带南亚带西段吴家山复背斜北翼。西成盆地构造线呈近EW向展布,构造较发育,总体上为一向北倾的单斜层,但次级褶皱及断裂异常发育^[13]。褶皱主要发育复背斜,吴家山复背斜构成西成地区主体构造格架。厂坝铅锌矿区构造受吴家山背斜控制,基本走向为EW,为“S”形扭曲的单斜层。 F_6 断层是厂坝与李沟的分界线,上盘是厂坝矿床,下盘为李家沟矿床(图1)。

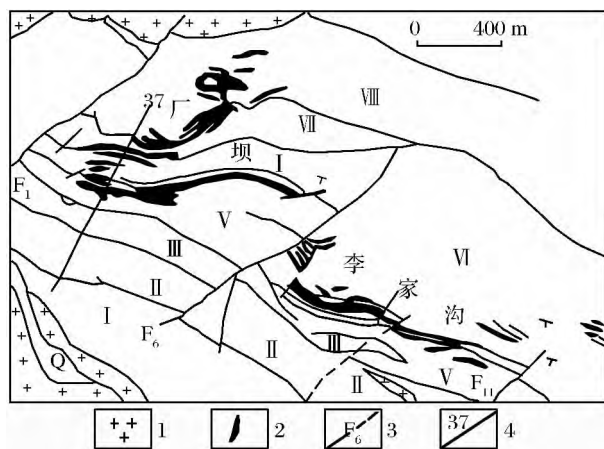


图1 厂坝—李家沟铅锌矿床地质图^[10]

Q—第四系坡积物; - 为中泥盆统安家岔组上段的不同岩性段,以云母石英片岩、大理岩和白云岩为主; 1.花岗岩体 2.铅锌矿体及编号 3.断层 4.勘探线及编号

矿区地层以泥盆系为主,自下而上可分为吴家山组、安家岔组、西汉水组和洞山组^[15]。矿体主要赋存在中泥盆统安家岔组具有变质性质的碎屑岩—碳酸盐岩建造中^[16-18],总体与地层产状一致,呈层状、似层状和透镜状与围岩整合产出。矿石矿物主要为黄铁矿和闪锌矿,其次为方铅矿,含少量毒砂、磁黄铁矿和黄铜矿等。矿区西部的南北两侧分别是印支期厂坝二长花岗岩体和黄渚关花岗闪长岩体,这些岩体多形成于幔源基性岩浆与壳源酸性岩浆的混合^[19]。伴随印支期秦岭褶皱造山过程,西成盆地中曾有广泛的热变质作用,并对铅锌矿床产生了重要影响,在厂坝—李家沟矿区及外围,因受黄渚关和厂坝岩体侵入活动影响,泥盆系发生接触变质作用^[11,19]。

2 样品分析与方法

本文中用于测试的黄铁矿样品主要采自厂坝

一号洞(1298中段)样品是在矿道内采集的新鲜铅锌矿石,黄铁矿呈自形立方体结构,未见后期改造痕迹。样品的选择基于对矿体、矿石形态特征的详细观察和矿山技术工作人员的正确引导,初步确保成矿期次和矿石成分的一致性。样品处理过程如下:首先,对所采集的部分样品进行光薄片鉴定(共计7个样品,鉴定其中5个),观察研究其结构构造特征及矿物组成,并进一步确保样品的成矿期次及矿石成分的一致性。结果表明,样品中主要金属矿物为黄铁矿和闪锌矿,含方铅矿及少量黄铜矿,其中黄铁矿呈淡黄色反射色,反射率高,具均质性,呈自行或半自形晶粒分布(单个样品中的自形程度一致)裂隙结构发育,并被闪锌矿填充。然后,将原样磨碎至40~200目,用蒸馏水清除当中的吸附物质,放置在烘干箱中迅速烘干,以防止其与水反应或表面发生氧化,烘干时温度控制在45~60℃之间,时间为10~12h。烘干后从中挑选出40~60目黄铁矿样品,纯度在98%以上。测试对象为黄铁矿流体包裹体中的稀有气体——He、Ar同位素,使用真空压碎法获取流体包裹体中的稀有气体。本次测试在中国科学院矿床地球化学国家重点实验室完成,测试仪器为GV5400型静态真空稀有气体质谱仪,结果见表1。在使用真空压碎法的过程中,首先对黄铁矿样品进行超声波丙酮溶液清洗、烘干,通过在压碎装置中于120~150℃温度条件下烘烤,除去矿物和装置中吸附的大气成分,然后在高真空状态下压碎样品,释放流体包裹体中的气体,并对其纯化、分离及稀有气体同位素分析。

3 结果

根据表1,厂坝铅锌矿黄铁矿流体包裹体中, ^{40}Ar 丰度为 $0.1455 \times 10^{-7} \sim 43.6619 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$,平均值为 $7.65 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值介于294.04~580.60,均值为438.78, ^3He 丰度为 $2.3255 \times 10^{-7} \sim 36.0701 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$,平均值为 $12.5418 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值介于0.0137~0.0758 Ra,平均值为0.0384。

4 讨论

4.1 分析结果的影响因素

稀有气体He、Ar的测试对象为黄铁矿中的流体包裹体。流体包裹体之所以能够指示矿物形成时

表 1 甘肃厂坝铅锌矿床黄铁矿流体包裹体氦、氩同位素组成分析结果

样品编号	⁴⁰ Ar/×10 ⁻⁷	³⁶ Ar/×10 ⁻¹⁰	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	⁴ He/×10 ⁻⁷	³ He/×10 ⁻¹⁵	Rc/×10 ⁻⁸	Rc/Ra	⁴⁰ Ar*/ ⁴ He	⁴⁰ Ar*/%	F ⁴ He
XCH-CB-01	0.6927	1.3163	526.20	8.2303	32.7834	3.9833	0.0287	0.0369	43.84	37 780.07
XCH-CB-02	0.4165	0.9687	429.93	3.1163	15.9892	5.1308	0.0369	0.0418	31.27	19 438.01
XCH-CB-03	0.3035	0.9051	335.32	6.1168	12.5304	2.0485	0.0147	0.0059	11.88	40 834.73
XCH-CB-04	0.1455	0.3454	421.24	2.3255	4.4381	1.9085	0.0137	0.0187	29.85	40 681.41
XCH-CB-05	0.4765	0.9841	484.16	5.2922	49.8652	9.4224	0.0678	0.0351	38.97	32 493.69
XCH-CB-06	7.8741	13.5621	580.60	36.070	380.278	10.5427	0.0758	0.1072	49.10	16 070.20
XCH-CB-62	43.662	148.492	294.04	26.641	115.817	4.3472	0.0313	-0.0082	-0.50	1 084.05

注 Rc 为样品的 ³He/⁴He 比值, Ra 为空气的 ³He/⁴He 比值(取 1.40×10⁻⁶), ⁴⁰Ar* 表示扣除空气 ⁴⁰Ar 后的过剩氩, ⁴⁰Ar*=(⁴⁰Ar)_{样品}-295.5×(³⁶Ar)_{样品}, ⁴⁰Ar*(%)表示成矿流体中放射成因 ⁴⁰Ar 的相对含量, ⁴⁰Ar*(%)=[1-295.5/(⁴⁰Ar/³⁶Ar)_{样品}]×100, F⁴He=(⁴He/³⁶Ar)_{样品}/(⁴He/³⁶Ar)_{大气}, 大气中 ⁴He/³⁶Ar 值为 0.1655

的流体介质环境和提供矿床原始成因信息,是因为流体包裹体在形成时宿主矿物捕获了周围的流体介质,包裹体壁的密封性比较好,其他来源的流体介质对它产生的影响小,尤其是流体包裹体的寄主矿物为硫酸盐和硫化物时,包裹体内的稀有气体被捕获后不会发生明显的扩散丢失^[1,20]。研究表明,黄铁矿流体包裹体对 He、Ar 的保存能力强,具有很低的 He、Ar 扩散系数^[20-23],同时,由扩散作用和沸腾作用所引起的同位素分馏对黄铁矿流体包裹体中稀有气体的同位素组成影响甚微^[20,24-25],因此,黄铁矿流体包裹体中 He、Ar 同位素组成能更好地代表成矿流体的原始组分,是探测成矿流体原始成分的理想对象。前人以西成铅锌矿区黄铁矿流体包裹体为对象,进行了流体性质及组分方面的研究^[26],由此证实了对厂坝铅锌矿黄铁矿流体包裹体进行研究的可行性。本次所采黄铁矿样品晶型完整,呈自形立方体结构,表明其形成后未受后期改造影响,因此其流体包裹体以原生包裹体为主,且在相同条件下,黄铁矿对 He、Ar 的保存能力强于闪锌矿^[23]。本次样品采自地下坑道内,故没有宇宙成因 ³He 的加入。在使用真空压碎法对流体包裹体进行分析的过程中,稳定同位素往往产生较为明显的分馏,但对于稀有气体而言,同位素的分馏情况并不明显,即使是最容易产生同位素分馏的 Xe^[20,27]。此外,大气 He 对样品的混染情况可采用 F⁴He 值来判断,当样品中有大气 He 混入时, F⁴He 值为 1^[28],本次测试样品中 F⁴He 的最小值为 1.084(表 1),远大于 1,这表明测试结果不受大气混染的影响。综上所述,本次测试所得的黄铁矿流体包裹体中 He、Ar 同位素值能够反映黄铁矿形成过程中被捕获的成矿流体的原始信息。

4.2 成矿流体来源

研究表明^[29-33],热液流体中 He、Ar 同位素主要包括大气饱和水(ASW)、地幔流体(M)和地壳流体(C)3种来源,且不同来源的 ³He/⁴He 和 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 有明显区别:大气饱和水,主要包括大气降水和海水,其 He、Ar 特征为 ³He/⁴He=1 Ra (Ra=1.4×10⁻⁶), ⁴⁰Ar/³⁶Ar=295.5;深源地幔流体, ³He/⁴He 和 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 值分别为 6~9 Ra 和 40 000 以上;地壳流体,主要包括建造水和盆地热卤水, ³He/⁴He 为 0.01~0.05 Ra, ⁴⁰Ar/³⁶Ar>295.5。

(1)He 同位素对成矿流体来源的指示。根据表 1 测定结果, ³He/⁴He 值介于 0.0137~0.0758 Ra(平均值为 0.0384),基本上与地壳来源流体的 ³He/⁴He 值一致。在 ³He-⁴He 图(图 2)中,部分样品的丰度值点直接落入地壳氦端元所在的区域,其余点均靠近该区域且略微偏向地幔端元,由此可见厂坝铅锌矿成矿流体中的 He 主要为壳源成因。

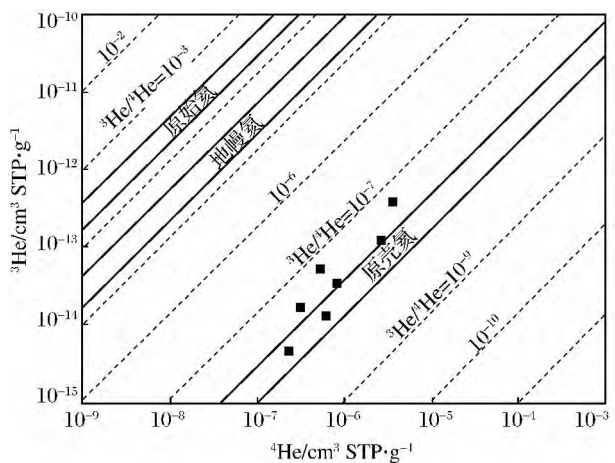


图 2 厂坝铅锌矿黄铁矿流体包裹体 ³He-⁴He 图^[24]

大气中极低的 He 含量对地壳流体中 He 的同位素组成及丰度影响甚微^[21],因此厂坝铅锌矿成矿

流体中的 He 只能有 2 个源区——地幔来源或具有放射成因的地壳来源,由此根据壳—幔二元体系复合模式可计算样品中幔源氦加入的份额^[34]:

$$\text{幔源 He}(\%) = \frac{(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{样品}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{壳}}}{(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{幔}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{壳}}} \times 100 \quad (1)$$

取地壳和地幔 2 个端元的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值分别为 0.01 Ra 和 6 Ra, 通过计算得到厂坝铅锌矿黄铁矿样品中流体包裹体幔源 He 比例分别为 0.31%、0.45%、0.08%、0.06%、0.96%、1.10% 和 0.36%, 最大为 1.10%, 其余均不足 1.0%, 表明厂坝铅锌矿成矿流体中的 He 主要为地壳放射性成因, 反映出成矿流体的壳源性质。

(2) $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} - \text{R}/\text{Ra}$ 图解对成矿流体来源的反映。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} - \text{R}/\text{Ra}$ 图解(图 3)中, 样品值大部分落入地壳流端元所在的区域中, 其余皆投在该区域附近, 并略微偏向大气饱和水, 表明厂坝铅锌矿的成矿流体主要为地壳流体, 只有很少量的大气饱和水参与。

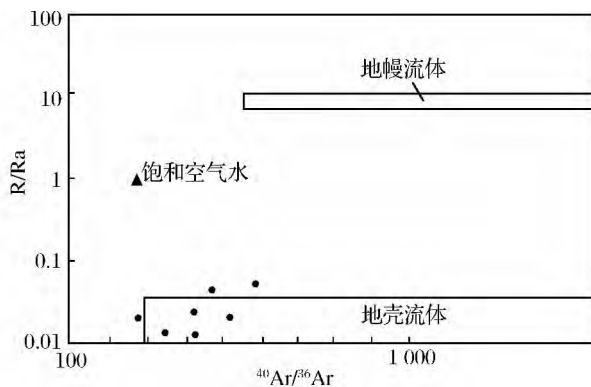


图 3 厂坝铅锌矿成矿流体 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} - \text{R}/\text{Ra}$ 图解^[28]

据前人研究成果^[14, 35], 厂坝铅锌矿田的石英流体包裹体从整体上反映出成岩、成矿作用前的原始卤水应属中低温、盐度较高的高纯氯化物型卤水, 石英中包裹体的液相成分为 $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ 型卤水, 推断原始成矿热液是高纯氯化物型卤水。流体包裹体的 H、O 同位素研究表明, 成矿流体主要来源于原生建造水, 可能有少量地下水参与^[26]。王天刚等^[10]通过对石英含碳流体包裹体的研究, 认为厂坝铅锌矿床形成以后受到后期地质构造演化和区域变质热液改造的作用。综上所述, 厂坝铅锌矿床成矿流体虽然在成因方面显得比较复杂, 但从总体上反映出明显的壳源属性, 并含有少量饱和大气水, 与本文对 He 同位素的分析结果基本一致。

(3)Ar 同位素对成矿流体来源的指示。相对于 He 而言, Ar 具有大气饱和水、地壳和地幔 3 个端元。厂坝铅锌矿黄铁矿流体包裹体 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 平均比值为 438.78(表 1), 高于大气饱和水的 Ar 同位素特征值 ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 295.5$)。具有高的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值是地幔 Ar 与地壳中具有放射成因 Ar 的共有特征, 因此成矿流体中 Ar 的来源无法通过较高的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值来确定^[21]。前文通过对样品中 He 同位素值的分析, 得出成矿流体具有壳源性质, 几乎无幔源成分, 由此可以判定样品中较高的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值是由地壳中放射成因的 ^{40}Ar 加入成矿流体所造成的。成矿流体中放射成因 ^{40}Ar 相对含量可由下式计算^[22, 36]。

$$^{40}\text{Ar}^*(\%) = [1 - 295.5 / (^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{样品}}] \times 100 \quad (2)$$

计算结果(表 1)显示, 厂坝铅锌矿成矿流体中具有放射性成因的 ^{40}Ar 相对含量为 11.88%~49.10%(其中 XCH-CB-62 号样品中为负值, 无讨论意义), 均值为 34.15%; 大气 ^{40}Ar 相对含量为 50.90%~88.12%, 均值为 65.85%。这表明成矿流体中具有大气饱和水来源的 Ar 占有很大比重, 大气饱和水曾参与了成矿作用。

(4) $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 比值分析。地幔流体的 $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 比值为 0.33~0.56^[37], 地壳流体的 $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 平均值为 0.156^[30, 38]。从表 1 可以看出, 具有壳源性质的厂坝铅锌矿床流体中, $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 值为 0.0059~0.1072(其中 XCH-CB-62 号样品中为负值, 无讨论意义), 平均值为 0.041, 大大低于具有正常地壳流体的 $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 值(0.156)。研究表明^[21] 现代地下水 $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 值的降低是地下水从流经岩石中优先获取 ^4He 的结果, 地下水从地壳岩石中获取放射性成因 ^4He 和 ^{40}Ar 流体对地壳中具放射性成因的 ^4He 和 ^{40}Ar 的获取能力与氦气的封闭温度有关。就多数矿物而言, 氦的封闭温度很低($< 200\text{ }^\circ\text{C}$, 许多含铀矿物氦的封闭温度 $< 100\text{ }^\circ\text{C}$), 而氩的封闭温度则高得多($> 200\text{ }^\circ\text{C}$)。前人通过对厂坝铅锌矿硫化物矿物平衡温度的分析^[8]和对矿床中各矿物流体包裹体的研究^[26], 得出成矿温度在 150~320 $^\circ\text{C}$ 之间。此温度能够使大气水同时获取地壳中的 ^4He 和 ^{40}Ar , 只是在获取的量上存在差异, 而这种差异不足以支撑厂坝铅锌矿成矿流体中 $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 明显的低值特征。这一低值特征应该与矿体附近的岩体具有较高放射性成因的 ^4He 有关, 在厂坝矿区西部的南北两侧分布有印

支期中酸性侵入岩体^[19],这些岩体本身具有较高的 U、Th 含量,U、Th 发生裂变可产生⁴He,⁴He 含量的增加可导致成矿流体中⁴⁰Ar*/⁴He 值的降低。

4.3 成矿流体的演化

通过对厂坝铅锌矿黄铁矿流体包裹体 He、Ar 同位素数据的综合分析,并结合前人研究成果,可将成矿流体的演化划分为明显的 2 个阶段:大气饱和水与地壳流体的混合成矿阶段和地壳流体(以变质流体为主)作用下的成矿阶段。厂坝铅锌矿属于喷流—沉积型矿床^[6,8,9,18,39-40],泥盆纪时期在伸展裂解的地质构造背景下经历了喷流沉积作用,形成富矿体,后来又又在印支—燕山早期受到强烈构造运动的改造^[10,41],并最终成矿。在喷流沉积阶段,海水的下渗以及地壳热卤水与海水的混合使得成矿流体中富含大气饱和水,并使得成矿流体的⁴⁰Ar*(%)值很低。在印支—燕山早期的构造运动中,伴随着地壳的强烈运动及中酸性岩浆的侵入,在动力及热变质作用下,厂坝铅锌矿区及其周围地层发生了不同程度的变质。在此过程中,具有较高温度及挥发性较强的地壳流体(包括变质热液、变质热液与地下水的混合流体)与矿区周围的中酸性岩体发生水—岩交换,获取了地壳中放射性成因的⁴He 及部分的⁴⁰Ar,使得成矿流体的⁴⁰Ar*/⁴He 值降低,并参与了厂坝铅锌矿中成矿元素的富集和改造。对厂坝铅锌矿 S、C 等同位素的研究表明,其在印支期—燕山期所受的构造改造作用是在相对封闭的环境下进行的^[8,42],因此该阶段只存在部分变质流体及很少量的大气饱和水对厂坝铅锌矿的改造作用,而其更多地表现为成矿体系内部的物质交换和重组。成矿流体中,喷流沉积阶段参与成矿作用的大气饱和水也在印支—燕山期的矿床改造过程中转化为地壳流体。

5 结论

(1)厂坝铅锌矿成矿流体的³He/⁴He 值为 0.0137~0.0758 Ra,平均值为 0.0384 Ra,基本上与地壳来源流体的³He/⁴He 值一致。

(2)厂坝铅锌矿黄铁矿流体包裹体⁴⁰Ar/³⁶Ar 平均值为 438.78,高于大气饱和水的 Ar 同位素特征值(⁴⁰Ar/³⁶Ar=295.5),其原因在于地壳中放射成因的⁴⁰Ar 加入成矿流体,⁴⁰Ar*/⁴He 值为 0.0059~0.1072,明显低于地壳特征值,可能与矿床附近的岩体具有较高放射性成因的⁴He 有关。

(3)对成矿流体中放射性成因⁴⁰Ar 相对含量⁴⁰Ar*(%)值的分析表明,大气饱和水曾参与成矿作用。

(4)厂坝铅锌矿成矿流体是喷流沉积作用和后期构造运动对矿床的改造作用叠加影响的结果。

参考文献:

- [1] 李兆丽,胡瑞忠,彭建堂,等.稀有气体同位素示踪成矿古流体研究进展[J].地球科学进展,2005,20(1):57-63.
- [2] 马锦龙,陶明信.稀有气体同位素地球化学研究进展[J].地球学报,2002,23(5):471-476.
- [3] 王梁,雷时斌,贾丽琼.流体包裹体在矿床学研究中的应用[J].黄金科学技术,2011,19(4):25-30.
- [4] 倪培,范宏瑞,丁俊英.流体包裹体研究进展[J].矿物岩石地球化学通报,2014(1):1-5.
- [5] 卢焕章,郭迪江.流体包裹体研究的进展和方向[J].地质论评,2000(4):385-392.
- [6] 古志宏,赵俊兴,周永章,等.西秦岭厂坝—李家沟铅锌矿床地质特征和成因分析[J].中山大学研究生学刊(自然科学、医学版),2007,28(3):40-46.
- [7] 孙省利,高兆奎,魏晓辉,等.西成铅锌成矿带泥盆系硅质岩地质地球化学特征与热水沉积成矿[J].西北地质,2000,33(2):1-7.
- [8] 俞中辉,祝新友,童随友,等.西成地区铅—锌矿、金矿硫铅同位素特征及成矿关系的研究[J].矿产与地质,2008,22(3):196-203.
- [9] 祝新友,汪东波,卫治国,等.西成地区碳酸盐岩 REE 特征及厂坝矿床白云岩成因[J].矿床地质,2005,24(6):613-620.
- [10] 王天刚,倪培,沈昆,等.西秦岭厂坝—李家沟铅锌矿床流体包裹体特征及成因意义[J].南京大学学报(自然科学版),2011,47(6):731-743.
- [11] 胡乔青,王义天,魏然,等.西秦岭厂坝—李家沟铅锌矿床砂卡岩化与成矿关系探讨[J].矿物学报,2013(增):12-13.
- [12] 殷先明.西秦岭中生代花岗岩类岩浆作用及成矿[J].甘肃地质,2015(1):1-10.
- [13] 祝新友,王瑞廷,汪东波.西秦岭铅锌金铜银矿床模式研究及找矿预测[M].北京:地质出版社,2011.
- [14] 杨松年,缪远兴.厂坝—李家沟铅锌矿床地质特征[J].矿床地质,1986,5(2):14-23.
- [15] 王集磊,何伯犀,李建中.中国秦岭型铅锌矿床[M].北京:地质出版社,1996.
- [16] 陈光.西成铅锌矿化集中区热水沉积成矿作用的岩矿证据[J].甘肃地质学报,2002,11(1):32-43.

- [17] 邓海军,朱多录.甘肃西成矿集区成矿系列及找矿前景[J].地质与勘探,2010,46(6):1045-1050.
- [18] 匡文龙,陈年生,张万虎,等.厂坝—李家沟 SEDEX 型铅锌矿床成矿作用研究[J].大地构造与成矿学,2009,33(4):542-547.
- [19] 李永军,高占华,李英,等.西秦岭温泉岩浆混合花岗岩的地球化学特征[J].地质地球化学,2003,31(4):43-49.
- [20] 胡瑞忠.成矿流体氦、氩同位素地球化学[J].矿物岩石地球化学通报,1997,16(2):52-56.
- [21] 胡瑞忠,毕献武,Turner G,等.袁牢山金矿带金成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学[J].中国科学(地球科学),1999,29(4):321-330.
- [22] 杨猛,王居里,王建其,等.新疆望峰金矿成矿流体的 He、Ar 同位素示踪[J].地球学报,2012,33(5):794-800.
- [23] 张东亮,郑德顺,彭建堂,等.矿物流体包裹体中稀有气体的保存能力初探[J].矿床地质,2011,30(5):933-940.
- [24] 李晓峰,毛景文,王义天,等.惰性气体同位素和卤素示踪成矿流体来源[J].地质论评,2003,49(5):513-521.
- [25] 李延河,李金城,宋鹤彬,等.矿物流体包裹体的氦同位素分析及地质应用[J].矿床地质,2002,21(增):982-985.
- [26] 李英.西成矿田层控铅锌矿床稳定同位素和包裹体研究[J].地球科学与环境学报,1986,8(2):40-50.
- [27] Knauth L P, Beeunas M A. Isotope geochemistry of fluid inclusions in permian halite with implications for the isotopic history of ocean water and the origin of saline formation waters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(3):419-433.
- [28] Zhu L, Zhang G, Guo B et al. He-Ar isotopic system of fluid inclusions in pyrite from the molybdenum deposits in south margin of North China Block and its trace to metallogenetic and geodynamic background[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(14):2479-2492.
- [29] Burnard P G, Polya D A. Importance of mantle derived fluids during granite associated hydrothermal circulation: He and Ar isotopes of ore minerals from Panasqueira[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(7):1607-1615.
- [30] Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P et al. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids - He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae-Hwa W-Mo mineralization, South-Korea[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(22):4663-4673.
- [31] Hu R Z, Burnard P G, Bi X W et al. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River-Jinshajiang fault belt, SW China[J]. *Chemical Geology*, 2004, 203(3/4):305-317.
- [32] Hu R Z, Burnard P G, Bi X W et al. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi Province, China: Evidence from He, Ar and C isotopes[J]. *Chemical Geology*, 2009, 266(1/2):86-95.
- [33] Burnard P G, Hu R, Turner G et al. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(10):1595-1604.
- [34] Kendrick M A, Burgess R, Patrick R A D et al. Fluid inclusion noble gas and halogen evidence on the origin of Cu-Porphyry mineralising fluids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(16):2651-2668.
- [35] 冀元杰.甘肃成县厂坝—李家沟热水—沉积铅锌矿床地质特征[J].甘肃地质学报,1992,1(2):32-50.
- [36] 丁德建,梁金龙,孙卫东,等.阳山金矿成矿流体的 He-Ar 同位素示踪[J].矿物岩石地球化学通报,2014,33(6):813-819.
- [37] Dunai T J, Baur H. Helium, neon and argon systematics of the european subcontinental mantle-implications for its geochemical evolution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(13):2767-2783.
- [38] 胡瑞忠,毕献武,Turner G,等.马厂箐铜矿床黄铁矿流体包裹体 He-Ar 同位素体系[J].中国科学(地球科学),1997,27(6):503-508.
- [39] 马国良,祁思敬,李英,等.厂坝铅锌矿床中钠长石岩的成因探讨[J].地质地球化学,1998,26(2):29-33.
- [40] 孙省利,曾允孚.西成矿化集中区热水沉积岩物质来源的同位素示踪及其意义[J].沉积学报,2002,20(1):41-46.
- [41] 朱多录,孙柏年,闫德飞,等.秦岭西成矿集区构造演化与铅锌成矿关系[J].地质学报,2012,86(8):1291-1297.
- [42] 祝新友,汪东波,卫治国,等.甘肃西成地区南北铅锌矿带矿床成矿特征及相互关系[J].中国地质,2006,33(6):1361-1370.

He-Ar Isotopic System of Fluid Inclusions in Pyrite from the Changba Lead-Zinc Deposit in Gansu Province

JIAO Xueyao^{1,2}, FAN Xiaolong^{1,2}, YU Pinghui^{1,2}, JIANG Guohao³, XIONG Wenbo^{1,2}, CHENG Zhiyan^{1,2}, MA Jinlong^{1,2}

1.School of Geological Sciences and Mineral Resources, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2.Key Laboratory of Mineral Resources in Western of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3.State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China

Abstract: The research about the Changba lead-zinc deposit has owned a wide concerns, especially in the undetermined sources of ore-forming fluids. The study mainly discussed the sources of ore-forming fluids according to analyze helium and argon isotopes compositions of fluid inclusions in pyrite from the Changba lead-zinc deposits. The results show that $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios are range from 0.0137 to 0.0758 Ra, which indicates that the ore-forming fluids were crust-derived fluids. The average of $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios is 438.78, which is higher than that of the air saturated water (295.5), indicated that radiogenic Ar in crust joined in ore-forming fluids. The low ratios of $^{40}\text{Ar}^*$ (%) and $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$ showed that the air saturated water involved in the ore-forming process, and part of ore-forming fluids captured higher radiogenic ^4He in surrounding rock. It is concluded that the ore-forming fluids of Changba lead-zinc deposit is formed by a comprehensive action of sedimentary-exhalative metallization in Devonian and tectonic alteration Indo-early Yanshan.

Key words: Changba lead-zinc deposit, helium and argon isotopes, ore-forming fluids, sources

贵州松桃发现亚洲第三大锰矿床

近日,从贵州省地矿局获悉,松桃自治县发现亚洲第三大锰矿床,储量达 1.06 亿 t。由贵州省地矿局提交的《贵州省松桃县桃子坪锰矿详查报告》通过评审备案,意味着位列全球十一、亚洲第三的超大型锰矿床诞生。

早在 20 世纪中叶,贵州省地矿局率先发现“大塘坡式”锰矿,使黔东以及铜仁市成为我国贵金属锰矿密集区和锰工业基地之一。但这一地表矿资源储量在 20 世纪末—20 世纪初告急,保有服务年限不足 10 年。

为缓解锰资源危机,开展锰矿富集区找矿、加快推进锰矿产业集群发展极其必要。省地矿局于 2008 年着力开展铜仁市的深部找矿,建立“锰矿古天然气渗漏成矿模式”,形成“贵州省黔东锰矿富集区深部大型—超大型锰矿找矿与成矿模式研究”这一全国十大地质科技成果。随后,这一被誉为颠覆传统锰矿成矿理论的观点,通过“裂谷盆地古天然气渗漏成矿理论和深部隐伏矿找矿预测模型”的具体实践,使黔东锰

矿找矿工作获得重要进展,实现了我国锰矿找矿有史以来的最大突破。

至 2015 年底,省地矿局累计钻探工作量已达 23.9 万 m,在松桃整装勘查区新发现普觉(整合)、道坨、松桃高地及松桃桃子坪 4 个世界级超大型锰矿床,形成一条巨型的锰矿成矿带。目前已成功备案 2 个锰矿床。

松桃位于黔东地区,属武陵山国家扶贫攻坚区,也是全国重要的锰矿产地。新的超大型锰矿床的发现,不仅改变了我国锰矿资源勘查开发格局,也为服务长江经济带建设和武陵山国家扶贫攻坚区脱贫致富提供了资源保障。

锰矿是国家紧缺的战略性矿产资源,同时,锰在动力电池、磁性材料等战略新兴产业不断拓展,已成为居铁、铝之后排位第三的大宗金属。我国作为全球最大的锰矿石和锰系材料生产、消费大国,年消费锰矿石 4 000 多万 t,目前锰资源的对外依存度约占 50%,一定程度制约了国家的经济安全。

(来源 贵视网)