

甘肃厂坝铅锌矿富甲烷流体包裹体的发现及其意义^{*}

王天刚 倪培^{**} 王国光 张婷

WANG TianGang, NI Pei^{**}, WANG GuoGuang and ZHANG Ting

南京大学内生矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地质流体研究所, 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093

State Key Laboratory for Mineral Deposit Research, Institute of Geo-Fluids, School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2008-05-10 收稿, 2008-07-31 改回.

Wang TG, Ni P, Wang GG and Zhang T. 2008. Identification and significance of methane-rich fluid inclusions in Changba Pb-Zn deposit, Gansu province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2105–2112

Abstract Changba Pb-Zn deposit, Gansu Province, China, is considered as SEDEX deposit. But researches about ore-forming fluid, especially fluid inclusions on it still lacked. This study made a systematic research works on fluid inclusions in Changba Pb-Zn deposit and for the first time identified the mono-phase methane-rich fluid inclusions, with homogenization temperatures between $-114 \sim -80^{\circ}\text{C}$; These methane-rich inclusions have two types of lower temperature phase behaviors on freezing and heating run. Laser-Raman microprobe analysis show that the volatile is dominantly CH_4 with some H_2S and minor amount of N_2 , CO_2 . Methane-rich fluid in Changba deposit might originate from the reduction of seawater by the organics on the seafloor. The identification of methane-rich fluid further verified the submarine hydrothermal exhalative genesis of Changba Pb-Zn deposit.

Key words Methane-dominated fluid inclusions; Quartz; Changba Pb-Zn deposit; Gansu Province; China

摘要 厂坝铅锌矿床被认为是海底喷流沉积型矿床,但对于该矿床成矿流体特别是流体包裹体研究非常薄弱。本文系统研究了厂坝铅锌矿床与矿石伴生石英中的流体包裹体,并首次发现了富甲烷流体包裹体。测温结果表明,单相富甲烷包裹体的低温相变有两种方式,气液相均一温度范围为 $-114 \sim -80^{\circ}\text{C}$ 。拉曼探针的测试结果显示 CH_4 为包裹体中的主要成分,另外有少量 H_2S 及微量的 N_2 、 CO_2 等气体。这种富甲烷流体可能是海底有机物还原海水形成,它的发现进一步佐证了厂坝铅锌矿床的海底热液喷流成因。

关键词 甲烷包裹体; 石英; 厂坝铅锌矿; 甘肃; 中国

中图法分类号 P589.1; P618.4

1 引言

地质流体与成矿作用的关系是近年来国际地学界着重研究的方向之一。块状硫化物矿床的成矿流体可以是来源于海水,也可以来自于岩浆水,有时还包括陆地下渗的大气降水。在海底环境下,流体与岩石的反应很剧烈,水岩之间的反应对于成矿元素的淋滤、迁移和沉淀十分重要。海底流

体的运动与板块分离、洋脊扩张、大洋俯冲等重大地质事件的关系尤为密切。因而研究块状硫化物矿床的流体成矿作用具有十分重要的意义。

70年代以来,由于板块构造理论的兴起,对于古代和现代海底热液成矿作用的研究达到了一个新的高度(Barnes, 1979; Rona 1984; Rona and Scott, 1993; Herzig and Hannington, 1995; Ohmoto, 1996; Solomon *et al.*, 2004),通过对海底热液活动与古代块状硫化物矿床的特征,建立了海底热液喷流沉积

^{*} 本文受 973 项目(编号 2006CB403500)资助。

第一作者简介: 王天刚,男,1983年生,博士研究生,矿床学专业, E-mail: wangtg1899@gmail.com

**** 通讯作者:** 倪培,教授,博士生导师, E-mail: peini@nju.edu.cn

成矿的模式,极大的丰富了现代成矿理论。与此同时,对该类矿床的流体作用,特别是流体包裹体方面的研究也得到了深入的开展,取得了大量的成果(Zaw *et al.*, 1996; Luders *et al.*, 2001; Hou *et al.*, 2001; 卢焕章, 2003; Paradis *et al.*, 2004; 倪培等, 2005)。此外,通过对海底热液流体中的挥发份的研究,发现海底热液常常富含甲烷。这些富甲烷流体在海底喷出后不会立即被氧化而在海底留存很长时间,所以富含甲烷的热液流体的存在常常被认为是海底热液活动的典型特征(Lilley *et al.*, 1982; Horibe *et al.*, 1986; Gamo *et al.*, 1987; Nojiri *et al.*, 1989; Baker *et al.*, 1990)。

甘肃省厂坝 SEDEX 型海底喷流沉积铅锌矿床位于秦岭多金属成矿带中的西成盆地中,该区泥盆系地层中除产出厂坝铅锌矿外,还产出了多个大型铅锌(银)矿床,是中国重要的铅锌成矿带。秦岭地区构造运动频繁,矿床类型多样。对于该地区的构造演化、地球化学、同位素及矿物学等方面的研究,前人已经做了较为详细的工作,并取得了很多成果(张国伟, 1988; 祁思敬和李英, 1993; 王集磊等, 1996; 马国良等, 1996, 1998; 杨建功, 1999; 孙省利和曾允孚, 2002; 朱弟成等, 2003; Ma *et al.*, 2004; 祝新友等, 2005)。尽管如此,对于该矿床的成矿流体的性质和演化等方面的系统研究的工作所做较少,只有王集磊等(1996)曾对该矿床的石英和闪锌矿中的流体包裹体做了初步的研究,报道了包裹体的均一温度范围和流体的阳离子组成,因此对于该矿床进行系统的包裹体研究极为必要。

2 区域地质概况

矿区位于中秦岭海西褶皱带南亚带西段,大地构造位置

位于华北板块与扬子板块之间。该区深大断裂发育,产生了很多受到断裂控制的盆地,考虑到该区当时处于拉张的构造背景下,很利于地壳深部甚至地幔物质上升喷流成矿(张国伟, 1988; 祁思敬和李英, 1993; 王集磊等, 1996)。

厂坝矿床所处的西成盆地是以山阳—麻沿河—礼县深大断裂带为界,与北部的北亚带及北秦岭加里东褶皱带相接,南侧以合作—江洛—镇安大断裂为界,与南秦岭加里东—印支期褶皱带相邻的一个受断裂控制的盆地,盆地内断裂发育,有利成矿流体的运移,区内产出多个大型矿床,如毕家山、邓家山、洛坝矿床等。

3 矿床地质特征

厂坝铅锌矿区主要出露地层为中泥盆统安家岔组和王家山组(图 1)。王家山组主要岩性为砂岩及碳酸岩;安家岔组地层则由一套细粒碎屑岩夹灰岩、白云岩组成,是主要的含矿地层(祁思敬和李英, 1993)。地层中有机质含量较高,而且从远离矿体的围岩到近矿体,有机碳含量表现出逐渐增高的趋势,说明有机质对成矿有着重要的作用(张成君, 1996; 张成君和崔彦力, 2000; 朱弟成等, 2003)。地层内有少量的喷流沉积岩,基本上以钠长岩为主,见于厂坝 II 号矿体下部,主要由钠长石、石英以及少量重晶石组成(马国良等, 1998)。

矿区北部出露黄渚关花岗岩闪长岩体,南部有厂坝二长花岗岩(图 1),两者的 Rb-Sr 等时线年龄分别为 240Ma 和 208Ma(祁思敬和李英, 1993),皆晚于成矿时代。厂坝矿床地层变质程度较低,为低级绿片岩相,局部由于地热梯度较大和岩浆侵入可达中级变质(杨建功, 1999)。

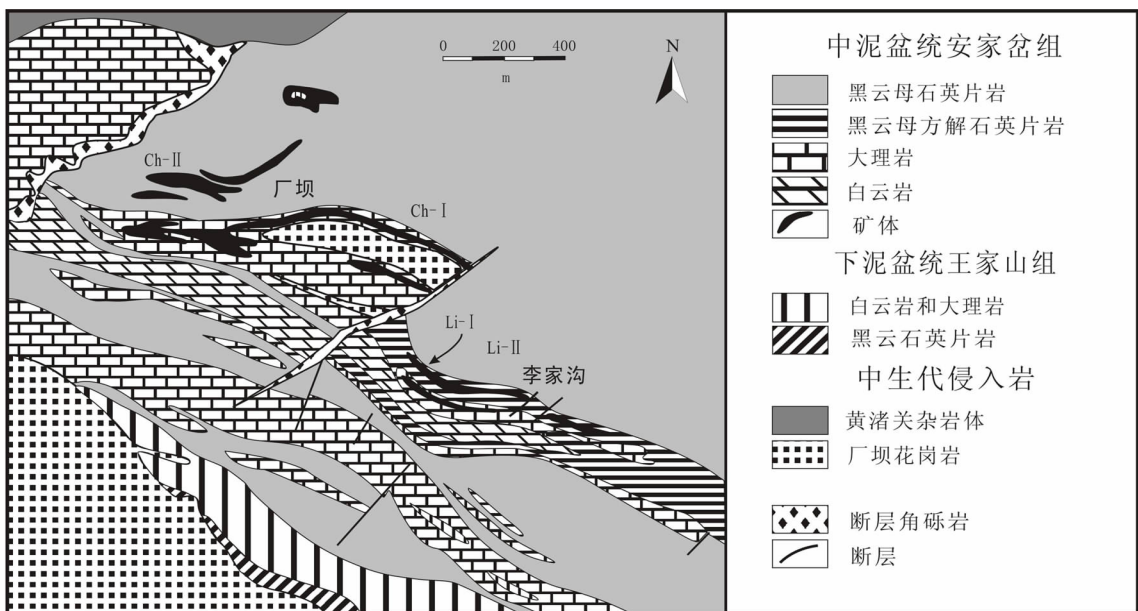


图 1 厂坝铅锌矿地质图

Fig. 1 Sketch geological map of the Changba Pb-Zn deposit

矿体多为层状、似层状、块状，次为透镜状，少量呈囊状、脉状，与围岩整合产出(图1)。厂坝矿床的总储量80.4Mt，Pb、Zn品位分别为1.32%、7.04%。主要金属矿物为：闪锌矿、黄铁矿、方铅矿，含少量毒砂、雌黄铁矿、黄铜矿；脉石矿物主要为方解石，次为石英，少量斜长石、微斜长石、黑云母等。

4 流体包裹体岩相学及显微测温

本文对厂坝铅锌矿中与金属硫化物伴生的石英进行了详细的流体包裹体岩相学和测温学研究。全部测试工作在南京大学内生金属成矿机制研究国家重点实验室流体包裹体实验室进行，所用仪器为英国产 Linkam THMS600 型冷热两用台，分析精度如表1所示：

表1 Linkam THMS600 型冷热两用台分析精度

Table 1 The precision of Linkam THM600 freezing/heating stage

温度区间	<30℃	30~300℃	300~600℃
精度	±0.2℃	±1℃	±2℃

4.1 流体包裹体岩相学

本研究选取与矿石密切伴生的层状矿体中的石英作为包裹体研究的对象。图2展示了作为研究对象的石英与矿石之间的共生关系：图2A、B是包裹体研究选取的矿石的照片，矿石呈层状构造，是原生的喷流沉积矿石的典型的结构特征；图2C、D展示的是显微镜下观察矿石中矿物的相互关系的照片，可以看出石英(白色)与矿石(黑色为黄铁矿，灰色为闪锌矿)存在着相互包裹的关系，表明石英与矿石基本

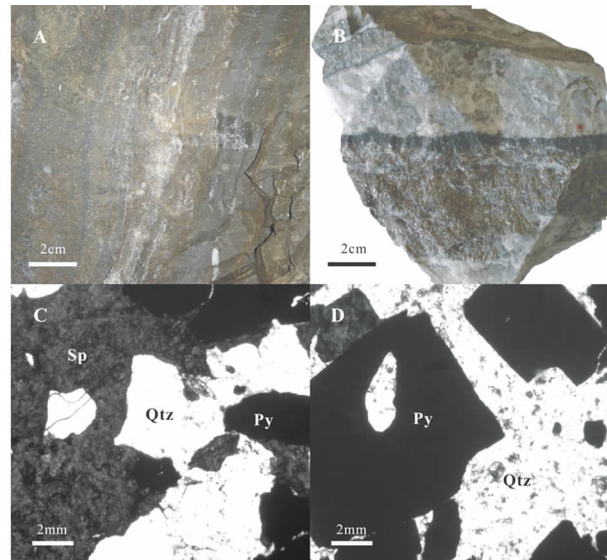


图2 层状矿石照片及矿物显微照片
Py-黄铁矿；Qtz-石英；Sp-闪锌矿

Fig. 2 Photograph of Bedded ores and microscopy of bedded ores
Py-Pyrite; Qtz-Quartz; Sp-Sphalerite

上是同时形成的。因此，石英中的包裹体能够指示原始矿床形成时海底热液流体的信息。

根据 Roedder(1984) 和卢焕章等(2004)提出的流体包裹体在室温下的相态分类准则，厂坝铅锌矿两个成矿阶段的石英流体包裹体可以分为四类(见图3)：

富液相 CH₄-H₂O 包裹体(图3B)，L 主要是水溶液，V 主要为 CH₄，H₂S、N₂ 和 CO₂ 含量较少。该类包裹体分布最为丰富，一般呈孤立状或沿生长环带分布，大小 3μm~10μm。主要呈椭圆形、长条形、负晶形及不规则形状，气相组分约占 5%~20%，其均一温度范围分布于 174~302℃ 区间。

富气相 CH₄-H₂O 包裹体(图3C)，L 主要是水溶液，V 主要为 CH₄，H₂S、N₂ 和少量 CO₂。该类包裹体出现较少，常与单相水溶液(H₂O)包裹体伴生，呈孤立状或沿生长环带分布，大小 3μm~10μm。主要呈椭圆形、负晶形及不规则形状，气相组分超过 50%。

单相富甲烷(CH₄)包裹体(图3A)，液相成分主要是 CH₄，含少量 H₂S、N₂、CO₂。该类包裹体呈孤立状或沿生长环带分布，大小 3μm~10μm。主要呈椭圆形、负晶形及不规则形状。与 CH₄-H₂O 包裹体和/或 H₂O 包裹体伴生。

单相水溶液(H₂O)包裹体(图3D)，液相成分主要为水溶液。该类包裹体出现较少，常与富气相 CH₄-H₂O 包裹体伴生，呈孤立或沿生长环带分布，大小 3μm~10μm。主要呈椭圆形、负晶形及不规则形状。

石英中的包裹体以富液相 CH₄-H₂O 包裹体为主，富气相 CH₄-H₂O 包裹体数量也较多。CH₄ 包裹体和 H₂O 包裹体较少。

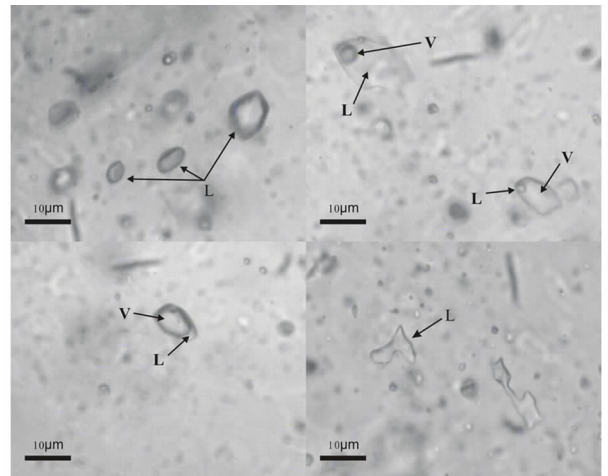


图3 厂坝铅锌矿石英中流体包裹体
A-单相富甲烷(CH₄)包裹体；B-富液相包裹体；C-富气相 CH₄-H₂O 包裹体；D-单相水溶液(H₂O)包裹体

Fig. 3 Fluid inclusions of quartz in Changba Pb-Zn deposit
A-Mono-phase CH₄-rich fluid inclusions; B-Liquid-rich CH₄-H₂O inclusion; C-Gas-rich CH₄-H₂O inclusion; D-Mono-phase aqueous fluid inclusion

4.2 流体包裹体显微测温

本文着重对单液相富甲烷(CH_4)包裹体进行显微测温研究。在显微测温过程中,利用前人提出的富甲烷包裹体显微测温方法(Kerkhof, 1990; Kerkhof and Hein, 1992; Kerkhof and Thiery, 2001)对富甲烷流体包裹体进行测温学研究。

流体包裹体显微测温过程中利用液氮做制冷剂,实验中所能达到的最低温度是 -196°C ,而甲烷的凝固点在 -182.5°C ,理论上来说在测温过程中应该可以观察到甲烷固体的出现,但是,由于体系的亚稳态的影响,这一现象很难被观察到(Roedder, 1984)。在显微测温过程中,观察到该矿床中富甲烷单液相流体包裹体的低温相变有两种方式:第一种是冷冻过程中仅仅出现气相和液相的包裹体;第二种是在冷冻过程中不仅出现液相和气相,而且还出现固相的包裹体。

第一种低温相变:室温下呈单相,冷冻过程中仅仅出现气相和液相的富甲烷包裹体。这种包裹体均一过程较为简单,在将包裹体从室温开始冷冻后,在 $-103 \sim -130^\circ\text{C}$ 左右,原来单液相的包裹体内部出现气泡;继续冷冻至 -196°C ,气泡变大但包裹体内并无其它相变,仍然为气液两相;之后的升温过程中,气泡逐渐变小,在 $-114 \sim -80^\circ\text{C}$ 之间,气泡消失,达到均一状态。图4显示的是一个该类包裹体冷冻—加热循环过程的实例。

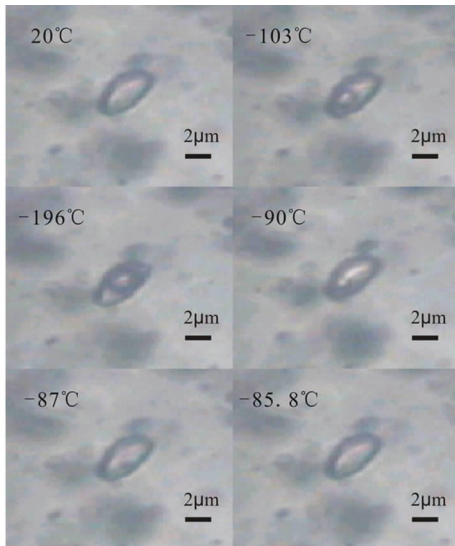


图4 厂坝铅锌矿石英中富甲烷单相包裹体测温过程
A-室温(20°C)下的单液相富 CH_4 包裹体; B-从室温冷冻至 -103°C 时,原来的单相包裹体中出现气泡; C-继续冷冻至 -196°C ,气泡体积持续增大; D-从 -196°C 升温至 -90°C 左右,气泡逐渐变小; E-继续升温至 -87°C ,气泡接近消失,在包裹体内不断跳动; F-直到 -83.7°C ,气泡消失,体系均一至液相
Fig. 4 Schematic representation of the determining of T_h of methane fluid inclusion in quartz

A-Mono-phase CH_4 -rich inclusion in room temperature; B-Bubble appeared when freezing to -103°C from room temperature; C-Bubble enlarged when freezing sequentially to -196°C ; D-Bubble decreased in size when heating from -196°C to -90°C ; E-Bubble almost disappeared on heating to -87°C ; F-Bubble disappeared in -83.7°C , inclusion homogenized to liquid phase

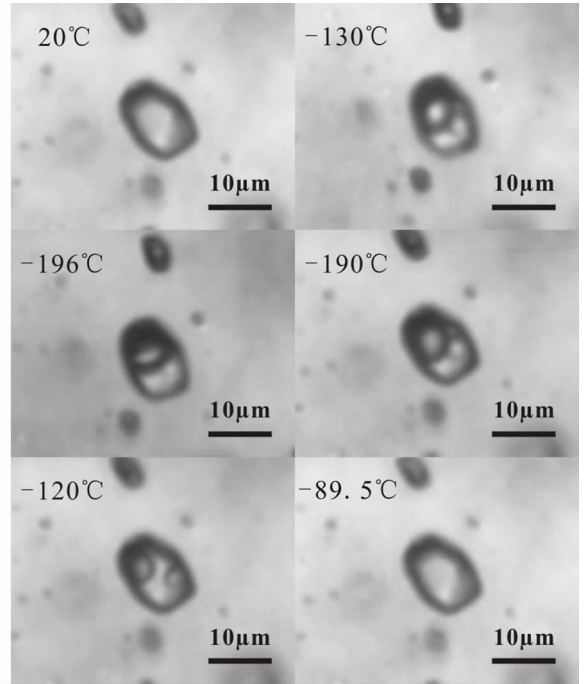


图5 厂坝铅锌矿石英中富甲烷单相包裹体测温过程
A-室温(20°C)下的单液相富 CH_4 包裹体; B-从室温冷冻至 -130°C 时,原来的单相包裹体中出现气泡和白色固体物质; C- -196°C 时,气泡发生变形; D-从 -196°C 加热至 -190°C ,气泡变圆,固体物质变清晰; E-升温至 -120°C 时,气泡明显变小,白色固体物质变化不大; F-升温至 -89.5°C 时,白色固体物质突然消失,气泡也随后消失,包裹体均一至液相

Fig. 5 Schematic representation of the determining of T_h of methane-enriched fluid inclusion in quartz

A-Mono-phase CH_4 -rich inclusion in room temperature; B-Bubble appeared and white solid phase formed when freezing to -130°C from room temperature; C-Bubble shape changed when freezing sequentially to -196°C ; D-Bubble changed to round shape and white solid phase became clear again when heating from -196°C to -190°C ; E-Bubble became smaller and white solid phase remained unchanged on heating to -120°C ; F-White solid phase suddenly disappeared on -89.5°C , and then bubble disappeared, inclusion homogenized to liquid phase

第二种低温相变:室温呈单相,冷冻过程中不仅出现液相和气相,而且还出现固相的富甲烷包裹体。这种包裹体从室温冷冻至 -130°C 左右时,包裹体内部不仅出现气泡,而且有一白色固体物质出现;将包裹体继续冷冻至 -196°C 时,气泡发生变形,此时,白色固体物质仍然保持原来的形状,只是没有原来清晰;之后的升温过程中,包裹体内部发生一系列的相变,缓慢升温过程至 -190°C 左右,气泡明显变圆,固体物质变清晰;继续升温至 -120°C 时,气泡明显变小,白色球状物质仍然没有融化;直到 -89.5°C ,白色小球消失,气泡也随之消失。图5展示的是一个该类单液相富甲烷包裹体的测温过程。

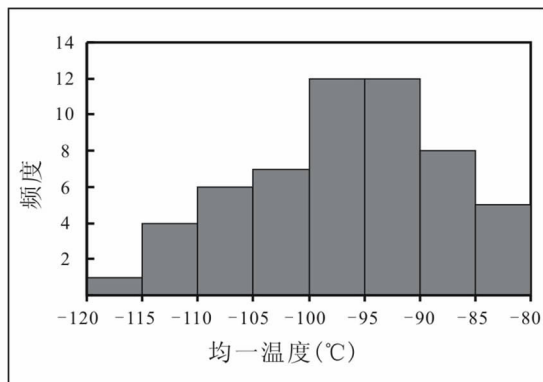


图6 厂坝铅锌矿石英中单相富甲烷流体包裹体测温结果

Fig. 6 Distribution of methane-enriched fluid inclusion homogenization temperatures in quartz

测温结果如图6所示,均一温度范围分布在-114~-80°C之间,纯甲烷体系的均一温度为-82.6°C,从测温结果可以看出,石英中富甲烷单相包裹体有些为纯甲烷包裹体,其均一温度在-82.6°C附近,还有一部分均一温度与纯CH₄体系相差较大的,表明其中含有其它挥发性气体如H₂S、N₂、CO₂等。

5 流体包裹体激光拉曼探针研究

利用英国产Renishaw2000型激光拉曼探针对石英中包裹体中气相成分做了激光拉曼探针测定,测试工作在南京大学成矿作用国家重点实验室包裹体实验室进行。实验条件:温度23°C,Ar离子离子激光器(514nm),风冷,狭缝宽50μm,光栅1800,包裹体扫描时间为20s,扫描次数2次。

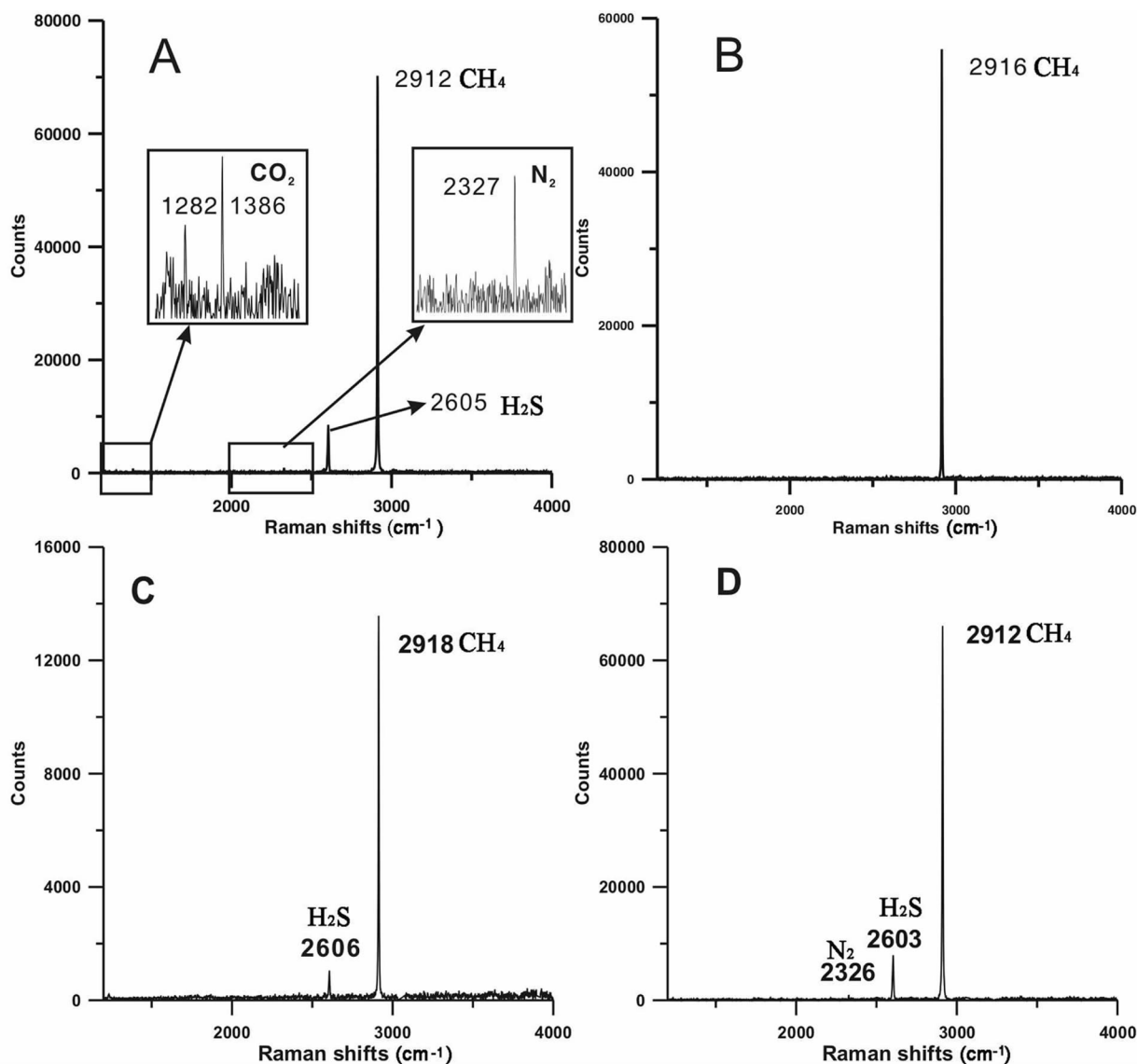


图7 厂坝铅锌矿石英中包裹体的拉曼特征谱线

Fig. 7 Raman spectroscopy of fluid inclusions of quartz in Changba deposit

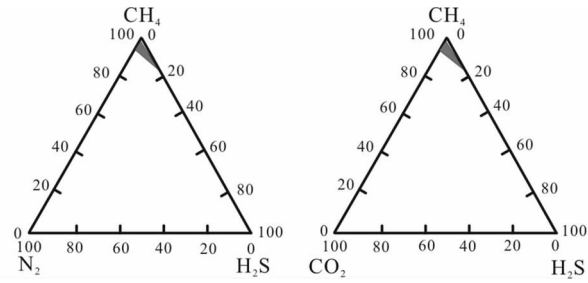


图8 甲烷包裹体气体组成百分含量(摩尔百分数)

Fig. 8 Proportions of different gases in methane-rich fluid inclusions (in mole%)

图7 A、B、C、D均为石英中富甲烷单相流体包裹体的特征谱线,从中可以看出气相,有些包裹体内为纯 CH_4 体系、有些包裹体内组分以 CH_4 为主,还含有少量 H_2S 、 N_2 、 CO_2 ,这与包裹体显微测温过程反映的富甲烷流体包裹体的体系组成吻合。通过对 CH_4 、 H_2S 、 N_2 、 CO_2 拉曼光谱计算谱峰面积,结合这些气体组分本身的性质,可以计算出甲烷包裹体中的气体组成的相对百分含量范围如图8所示。可见在这些包裹体中除了 CH_4 外, H_2S 是另一种含量较高的挥发份。

6 结论与讨论

6.1 富甲烷包裹体的低温相变及显微测温

富甲烷包裹体的部分均一温度在 $-114 \sim -80^\circ\text{C}$ 之间,与激光拉曼探针对于单个包裹体的测定结果是一致的。表明该类包裹体中既有 CH_4 包裹体(气液两相部分均一温度为 -82.6°C),也有以 CH_4 为主,同时含有少量 H_2S 、 N_2 、 CO_2 的富甲烷包裹体。

富甲烷包裹体冷冻过程中出现的白色固体物质,由于其熔化温度为 -89.5°C ,因此只可能是三相点受到 CH_4 或 N_2 影响的固态干冰、或者固态 H_2S (Roedder, 1984; Shepherd *et al.*, 1985)。结合拉曼测定结果,推断该白色固体物质最有可能为三相点受到影响的固态 H_2S ,因为该类包裹体中除 CH_4 外, H_2S 的含量较高,此外, H_2S 气体的三相点为 -82.9°C ,也接近于该白色固体物质的熔化温度。不过,对于该白色固体物质的准确判定,尚需要进行低温原位拉曼的进一步深入研究。

6.2 厂坝铅锌矿区富甲烷流体的来源

前人对海底热液中的甲烷的来源做了大量研究,并提出了甲烷的几种来源,即热化学还原海底有机物(Welhan, 1988)、低温下生物作用如细菌还原(Schoell, 1988)、地幔的去气作用(Schoell, 1988)及水岩反应(Charlou *et al.*, 1998)。厂坝矿床两相水溶液包裹体均一温度范围落在 $174 \sim 302^\circ\text{C}$ 区间,这个温度下的细菌活动较弱,因此排除了细菌活动产生甲烷的可能性;厂坝矿床附近未发现任何基性岩脉,海水

与基性岩发生水岩反应,在蛇纹石化的过程中释放甲烷也被排除;厂坝铅锌矿的富甲烷流体很可能来源于热化学还原海底有机物,因为该地层内有机物较为富集(张成君, 1996; 张成君和崔彦力, 2000; 朱弟成等, 2003),很可能与海底热液发生反应,生成甲烷;此外,地幔去气作用作为该地区甲烷的来源之一也不能被排除,这需要以后对流体包裹体内的氘氫同位素进行鉴定,进而确定其中是否存在地幔流体(范建国等, 2000)。

6.3 富甲烷流体在成矿过程中所起的作用

拉曼探针的测试结果显示,厂坝铅锌矿区富甲烷流体中的挥发份以甲烷为主, H_2S 的含量也较高,最高时可达达到15%左右,两种气体组分的出现,说明在厂坝铅锌矿形成过程中,海底热液演化可能经历了如下过程:在热化学还原作用下,甲烷或者有机物与循环的海水反应,将海水中的 SO_4^{2-} 离子还原为 S^{2-} 离子,富集 S^{2-} 离子的热液携带成矿金属如Zn、Pb等金属离子的能力更强(Barnes, 1979),有利于海底热液淋滤围岩中的金属元素。当富含金属离子和 S^{2-} 离子的热液到达海底时,随着压力、温度等条件的改变,金属离子与 S^{2-} 离子结合并沉积成矿。

6.4 富甲烷流体发现的意义

富甲烷流体作为一种海底热液中流体组分的典型代表,广泛发现于各个海底热液活动的区域。对于古代的块状硫化物Pb、Zn、Cu等矿床,寻找原生矿石中,以流体包裹体形式存在的富甲烷流体,是判别是否存在海底热液活动的重要证据,对矿床是否为MSD型矿床具有重要的指示意义。本次研究,通过野外地质观察和包裹体岩相学的研究,确定与矿石共生石英中的流体包裹体代表了原始成矿流体的成分。因此,富甲烷流体包裹体在厂坝铅锌矿床的发现,是对该矿床海底热液喷流沉积成因的进一步佐证。

致谢 本研究工作得到了973项目《华北大陆边缘造山过程与成矿》(编号2006CB403500)的资助,项目首席科学家陈衍景教授的大力支持与帮助,特此致谢;此外,在此对野外采集样品期间曾指导野外地质工作的兰州大学张铭杰教授、给予我们帮助的甘肃厂坝铅锌矿的袁群虎、石玉成、蔡文浩高级工程师致以诚挚的谢意,并感谢兰州大学的胡沛清老师、李钢柱博士在野外地质工作中提供的帮助。

References

- Baker ET, McDuff RE and Massoth GJ. 1990. Hydrothermal venting from the summit of a ridge axis seamount; Axial volcano, Juan de Fuca Ridge. *J. Geophys. Res.*, 95(12): 843–854
- Barnes HL. 1979. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York: John Wiley & Sons
- Charlou JL, Fouquet Y, Bougault H *et al.* 1998. Intense CH_4 plumes

- generated by serpentinization of ultramafic rocks at the intersection of the 15°20'N fracture zone and the Mid-Atlantic Ridge. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(13): 2323 – 2333
- Fan JG, Ni P and Tian JH. 2000. Fluid inclusion isotopes as tracers of ore fluids. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 15(3): 275 – 281 (in Chinese with English abstract)
- Gamo T, Ishibashi JI, Hitoshi SK *et al.* 1987. Methane anomalies in seawater above the Loihi submarine summit area, Hawaii. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(10): 2857 – 2864
- Herzig PM and Hannington MD. 1995. Polymetallic massive sulfides at the modern seafloor a review. *Ore Geology Reviews*, 10(2): 95 – 115
- Horibe Y, Kim KR and Craig H. 1986. Hydrothermal methane plumes in the Mariana back-arc spreading centre. *Nature*, 324(6093): 131 – 133
- Hou ZQ, Zaw K, Qu XM *et al.* 2001. Origin of the Gacun volcanic-hosted massive sulfide deposit in Sichuan, China; fluid inclusion and oxygen isotope evidence. *Economic Geology*, 96(7): 1491 – 1512
- Jacobs GK and Kerrick DM. 1981. Methane: An equation of state with application to the ternary system H₂O-CO₂-CH₄. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45(5): 607 – 614
- Kerkhof AM and Hein UF. 1992. H₂S-bearing systems. PACROFI-IV Program and Abstracts
- Kerkhof AM and Thiery R. 2001. Carbonic inclusions. *Lithos*, 55(1 – 4): 49 – 68
- Kerkhof AM. 1990. Isochoric phase diagrams in the systems CO₂-CH₄ and CO₂-N₂: Application to fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(3): 621 – 629
- Lilley MD, de Angelis MA and Gordon LI. 1982. CH₄, H₂, CO and N₂O in submarine hydrothermal vent waters. *Nature*, 300(5887): 48 – 50
- Lu HZ, Fan HR, Ni P *et al.* 2004. Fluid Inclusions. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Lu HZ. 2003. Ore forming fluids in recent ocean ridge sea floor mineralization; samples from 21°N, Pacific Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 235 – 241 (in Chinese with English abstract)
- Luders, Pracejus VB and Halbach P. 2001. Fluid inclusion and sulfur isotope studies in probable modern analogue Kuroko-type ores from the JADE hydrothermal field (Central Okinawa Trough, Japan). *Chemical Geology*, 173(1 – 3): 45 – 58
- Ma GL, Beaudoin G, Qi SJ *et al.* 2004. Geology and geochemistry of the Changba SEDEX Pb-Zn deposit, Qinling orogenic belt, China. *Mineralium Deposita*, 39(3): 380 – 395
- Ma GL, Qi SJ, Li Y *et al.* 1996. A study of the exhalative origin of the Changba lead-zinc deposit, Gansu Province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 11(3): 36 – 44 (in Chinese with English abstract)
- Ma GL, Qi SJ, Li Y *et al.* 1998. Genesis of albitites in Changba Pb-Zn ore deposit. *Geology Geochemistry*, 26(2): 29 – 33 (in Chinese with English abstract)
- Ni P, Tian JH, Zhu XT *et al.* 2005. Fluid inclusion studies on footwall stringer system mineralization of Yongping massive copper deposit, Jiangxi Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1339 – 1346 (in Chinese with English abstract)
- Nojiri YJ, Ishibashi JI, Kawai TY *et al.* 1989. Hydrothermal plumes along the North Fiji Basin spreading axis. *Nature*, 342(6250): 667 – 670
- Ohmoto H. 1996. Formation of volcanogenic massive sulfide deposits: The Kuroko perspective. *Ore Geology Reviews*, 10(3 – 6): 135 – 177
- Paradis S, Chi GX and Lavoie D. 2004. Fluid inclusion and isotope evidence for the origin of the Upton Ba-Zn-Pb deposit, Quebec Appalachians, Canada. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 99(4): 807 – 817
- Qi SJ and Li Y. 1993. Lead-Zinc Metallogenic Belt of Devonian Systems in Qinling Mountains. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Roedder. 1984. Fluid inclusions. *Minerological Society of America*
- Rona PA. 1984. Hydrothermal mineralization at seafloor spreading centers. *Earth-Science Reviews*, 20(1): 1 – 104
- Rona PA and Scott SD. 1993. A special issue on sea-floor hydrothermal mineralization; new perspectives; preface. *Economic Geology*, 88(8): 1933 – 1974
- Schoell M. 1988. Multiple origins of methane in the Earth. *Chemical Geology*, 71(1 – 3): 1 – 10
- Shepherd TJ, Rankin AH and Alderton DHM. 1985. A practical Guide to Fluid Inclusion Studies. Blackie & Son Limited
- Solomon MF, Tornos R, Large R *et al.* 2004. Zn-Pb-Cu volcanic-hosted massive sulphide deposits: Criteria for distinguishing brine pool-type from black smoker-type sulphide deposition. *Ore Geology Reviews*, 25(3 – 4): 259 – 283
- Sun SL and Zeng YF. 2002. Isotopic tracer of material origin for hydrothermal sedimentary rocks and significance in Xicheng mineralization area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(1): 41 – 46 (in Chinese with English abstract)
- Wang JL, He BX, Li JZ *et al.* 1996. Qinling-Type Lead-Zinc Deposits in China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Welhan JA. 1988. Origins of methane in hydrothermal systems. *Chemical Geology*, 71(1 – 3): 183 – 198
- Yang JG. 1999. Geology and metallogenic mechanism of The Lijiagou Pb-Zn deposit in Chengxian County, Gansu Province. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 8(23): 96 – 103 (in Chinese with English abstract)
- Zaw K, Gemmel JB, Large RR *et al.* 1996. Evolution and source of ore fluids in the stringer system, Hellyer VHMS deposit, Tasmania, Australia: Evidence from fluid inclusion microthermometry and geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 10(3 – 6): 251 – 278
- Zhang CJ. 1996. The character of kerogen in the Xicheng Pb-Zn orefield, Gansu Province. *Geological Review*, 42(3): 268 – 274 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW. 1988. Formation and Evolution of the Qinling Orogenic Belt. Xi'an: Northwestern University Press (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Zhu LD, Lin L *et al.* 2003. Organic mineralization of lead-zinc deposits in Devonian system, Xicheng ore field. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 28(2): 201 – 208 (in Chinese with English abstract)
- Zhu XY, Wang DB, Wei ZG *et al.* 2005. REE characteristics of carbonate rocks in Xicheng Devonian basin and origin of dolomite in Changba giant lead-zinc deposit. *Mineral Deposits*, 24(6): 613 – 620 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 范建国,倪培,田京辉. 2000. 成矿流体的流体包裹体同位素示踪探讨. *地质找矿论丛*, 15(3): 275 – 281
- 卢焕章. 2003. 现代海底烟囱中流体包裹体的研究. *岩石学报*, 19(2): 235 – 241
- 卢焕章,范弘瑞,倪培等. 2004. 流体包裹体. 北京:科学出版社
- 马国良,薛春纪,祁思敬等. 1996. 甘肃厂坝铅锌矿床喷气沉积成因研究. *地质找矿论丛*, 11(3): 36 – 44
- 马国良,薛春纪,祁思敬等. 1998. 厂坝铅锌矿床中钠长石岩的成因探讨. *地质地球化学*, 26(2): 29 – 33
- 倪培,田京辉,朱筱婷等. 2005. 江西永平铜矿下盘网脉状矿化的流

- 体包裹体研究. 岩石学报, 21(5): 1339 - 1346
- 祁思敬, 李英. 1993. 秦岭泥盆系铅锌多金属成矿带. 北京: 地质出版社
- 孙省利, 曾允孚. 2002. 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. 沉积学报, 20(1): 41 - 46
- 王集磊, 何伯墀, 李健中等. 1996. 中国秦岭型铅锌矿床. 北京: 地质出版社
- 杨建功. 1999. 甘肃省成县李家沟铅锌矿床成矿特征及成因机制. 有色金属矿产与勘查, 8(23): 96 - 103
- 张成君. 1996. 甘肃西成铅-锌矿田干酪根的特征. 地质论评, 42(3): 268 - 274
- 张成君, 崔彦力. 2000. 甘肃西成铅锌矿田有机质特征对沉积环境的判识. 兰州大学学报(自然科学版), 36(1): 121 - 126
- 张国伟. 1988. 秦岭造山带形成与演化. 西安: 西北大学出版社.
- 朱弟成, 朱利东, 林丽等. 2003. 西成矿田泥盆系铅锌矿床中的有机成矿作用. 地球科学——中国地质大学学报, 28(2): 201 - 208
- 祝新友, 汪东波, 卫治国等. 2005. 西成地区碳酸盐岩 REE 特征及厂坝矿床白云岩成因. 矿床地质, 24(6): 613 - 620