中国地质大学（北京）

硕士学位论文

豫西沙沟脉状Ag-Pb-Zn矿床地质特征和成矿流体研究

姓名：高建京

申请学位级别：硕士

专业：矿物学、岩石学、矿床学

指导教师：毛景文

20070501

Abstract

Key Words：geology, Shagou, Xiongershan， Ag-Pb-Zn,fluid inclusion, ore-forming fluid

声 明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国地质大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签　名：_____日　期：_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国地质大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

签　名：_____导师签名：_____日　期：_____

第一章 前 言

1.1 选题意义和依据

热液脉状银铅锌矿床是一类重要矿床，在世界范围内广泛分布，如美国加利福尼亚州的蓝德斯培克（Randsburg）和莫哈维（Mogave）矿床、新墨西哥州的莫格伦（mogllon）矿床、科罗拉多州中部的吉曼（Gilman）和巴塞克（Bassick）矿床，墨西哥中部的萨卡特斯特（Zacatecas）、塔克斯卡（Taxca）和帕楚卡（Pachuca）矿床，南欧罗多彼山脉中部铅锌银矿区、西德东部哈茨（Harz）地区的银铅矿脉，我国冀北蔡家营锌铅银矿床、豫西银洞沟银铅锌矿床、川西夏塞银铅锌矿床、湘南的纵树板和南风坳铅锌矿、浙东大岭口银铅锌矿床等。这类矿床可以细分为三类：（1）产于与中酸性岩浆作用有关的大陆边缘俯冲带的岩浆弧内（Sawkins，1989a）；（2）产于火山岩带内的浅成低温热液矿床；（3）产于仅存在少量火山岩的变碎屑岩带、与造山运动晚期地壳深部的伸展垮塌有关的脉状铅锌银矿床（Beaudoin and Sangster，1992）。它们的一些显著共同点已为许多研究者所注视（Nora K. Foley，et. al., 1993；K.M.Ferguson，1999；中国有色金属工业总公司，1990；陈正，1990），如矿体大都受构造控制而呈脉状或囊状等；矿石结构以填隙结构、结晶粒状结构和交代结构为特征；矿石构造以充填为主；矿石银品位变化大（n～n×1000 g/t）；蚀变矿物常为石英、碳酸盐、绢云母和绿泥石；具有中低温特点的热液矿物共生组合和标型元素；均一法和爆裂法测定的成矿温度为 143～358℃，与据闪锌矿内 FeS 计算的温度 135～350℃基本一致；成矿热液的盐度较低，为 4～11.8%；ZnS 的 $\delta^{34}S$ 值为 0.8～4.5‰，PbS 的 $\delta^{34}S$ 值为 0.7～3.2‰，FeS_2 的 $\delta^{34}S$ 值为 4.9～7‰等。沙沟矿床位于河南省洛宁县下峪乡沙沟-月亮沟的北西部，属于典型的热液脉状银铅锌矿床；详细地研究沙沟矿床的地质特征和成矿流体，对该矿床及铁炉坪-蒿坪沟-沙沟银（金）铅（锌）矿田的勘探和开发具有重要意义。

1.2 研究现状

1.2.1 热液脉状 Ag-Pb-Zn 矿床研究现状简述

脉状矿床可以定义为由矿石充填岩石裂隙形成的矿床（Haynes，1993）。热液意味着脉中的矿石和脉石矿物是从与岩浆作用有关或无关的热水溶液中沉淀出来的；通常，热

表 1-1 典型热液脉状银铅锌矿床

Table 1-1 Typical vain-type Ag-Pb-Zn mineral deposites

矿床	规模和品位	矿体形状	矿石矿物	蚀变矿物	控矿构造	构造坏境及岩浆岩	参考文献
夏塞 Ag-Pb-Zn-（Cu）	I 号矿体长 2200m,厚度平均为 1.8m，控制垂直深度 213m,平均品位 Ag 为 343g/t，Pb2.9%，Zn2.7. II 号矿体长 2800m，平均厚度 1.5m，控制垂深 274m，平均品位 Ag339g/t，Pb4%，Zn1.2%. III 号矿体长 2200m，平均厚 1.4m，控制垂深 169m 平均品位 Ag465g/t，Pb 6.6%，Z2.9%.	脉状、透镜状、囊状	主要为方铅矿、富铁闪锌矿，其次为黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、黄铜矿，少(微)量黄锡矿、锡石、自然铋和银金矿等。硫盐矿物主要有 Cu-Sb-Ag 硫盐(黝铜矿、含银黝铜矿和银黝铜矿)、Sb-Ag 硫盐(深红银矿、辉锑银矿)、Pb-Sb 硫盐(脆硫锑铅矿、硫锑铅矿)和 Bi-Pb 硫盐(斜方辉铋铅矿)	石英、绢云母、绿泥石、碳酸盐、阳起石	NNW 或近 SN 向裂隙	义敦岛弧带，矿区南 2km 处二长花岗岩 K-Ar 年龄为 82.6Ma	黄典豪等，2000；胡世华等，1996
蔡家营 Zn-Pb-Ag	已探明 III 矿段的锌金属量 144 万吨,Zn 平均品位为 4.26%，铅平均品位为 0.26%	不规则脉状、透镜状、囊状	主要有铁闪锌矿、含铁闪锌矿、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿，其次为毒砂、黄铜矿、白铁矿、磁黄铁矿、自然金、银金矿、自然银、浓红银矿、黝锑银矿、脆银矿、螺状硫银矿	石英、方解石、绿泥石、绢云母、铁方解石、阳起石	NEE 向断裂带次级的 NWW 向裂隙	华北地块北缘，存在薛家沟等花岗斑岩	黄典豪等，1992
铁炉坪 Ag-Pb	Ag 储量 1217 吨，平均品位 293g/t；铅储量 186772 吨，品均品位 3.1%	脉状、透镜状	主要是方铅矿、闪锌矿，其次为黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿，银矿物为自然银、含银黝铜矿、硫锑铜银矿	石英、绢云母、绿泥石、碳酸盐	NE-NNE 裂隙	华北地块南缘，存在小花岗斑岩体	陈衍景等，2003
银洞沟 Ag-Pb-Zn	块状、浸染-星点状、细脉-网脉状矿石银品位分别为 2420~6477g/t，528~1242g/t，63~314g/t；金品位变化较大，平均为 4.65~10.47g/t；铅平均品位为 0.58~3.63%；锌平均品位为 0.76~4.93%。	石英脉型和蚀变岩型	主要有自然银、辉银矿、黝铜矿-银黝铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、毒砂、白钨矿和硫锑铅矿等	主要有石英、绢云母、绿泥石、方解石等	近 SN 或 NE-NNE 向裂隙	东秦岭北部二郎坪地体	张静等，2004
南欧罗多彼山脉中部 Pb-Zn-Ag 矿区	6.5Mt Pb+Zn，平均品位为 7.5~8.0%；4000t Ag，平均品位为 30g/t	透镜状或管状	主要为方铅矿、闪锌矿	石英、绢云母、绿泥石	NW-NWW 或 NNE 向裂隙	横穿巴尔干半岛的构造带，存在古生代和中生代岩浆岩	J.G.Kelly,et.al.,2003

液矿床被认为是后生的。热水溶液通常为地下水、变质水或岩浆水，很多情况下很可能是这些水的混合。对于一个特定的矿床，由于仅根据同位素组成来区别水溶液来源所存在的困难，通常关于流体来源的推论须参考矿床的许多特征，包括地质背景、共生序列、流体包裹体和蚀变类型等。同样，试图只用同位素来区分脉状矿床的流体来源也会受到诸多限制。所以只有综合以上特征，结合矿石和脉石的矿物学特征、围岩组成和构造背景，并设计一个有效的方案，才能合理地对成矿热液进行探讨。

具有重要意义的 Pb、Zn 和 Ag（±Cu、Au、Sb、Bi、As、Ga、Ge、In）脉状矿床出现在两大类组合中。第一类组合是与中酸性岩浆作用有关的大陆边缘俯冲带的岩浆弧内（Sawkins，1989a）。岩浆岩通常为位于闪长岩到花岗闪长岩的范围，或者是相当的火山岩，尽管与侵入或火山中心的空间关系多变，甚至有时是不明显的。这些脉型矿床可以与相关的夕卡岩型矿床有关，但仅仅出现在非碳酸盐围岩的情况下；有时也可以与斑岩型 Mo(W)有关（叶会寿等，2006）。当出现分带时，Ag 通常富集在外围的矿脉中。矿床通常为多金属矿床，主要的矿石矿物为方铅矿、闪锌矿和黄铜矿。但 Beaudoin and Sangster（1992）对大量具有这种矿化类型的矿区进行了比较研究，对通常将脉和矿化与岩浆来源联系起来提出一些质疑，并提出一个产于仅存在少量火山岩的变碎屑岩带的铅锌银矿床模型，认为矿脉形成于造山运动后期，与地壳深部的伸展垮塌有关。

第二个组合为 Au、Cu、Pb 和 Zn（±As，Sb，Hg，Te,W），最常见于澳大利亚、加拿大、非洲和中国的太古宙绿岩带中。近些年，对这一组合矿床的形成进行了许多工作。如，Goldfarb（2001）详细研究了全球金矿成矿事件的时空分布，发现自太古宙以来，出现过 5 次金爆发成矿，恰好与超大陆聚合在时间上相吻合，进而完善和充实了碰撞造山与金矿大规模成矿的理论。Cox et al.（2001）提出断裂系统的扩容结 （dilational jogs）和马尾状发散带（horsetail splays）是有利的脉状金矿的定位空间等。

1.2.2 沙沟-铁炉坪-蒿坪沟 Ag（Au）-Pb（Zn）矿田研究现状

东秦岭熊耳山地区作为我国一个大型金、钼矿集区已为大家熟知，在过去十多年来，通过进一步找矿评价和勘查，一批银铅矿（包括铁炉坪、蒿坪沟和沙沟等）先后被发现和探明。这里将华北地块南缘熊耳山北坡西段的沙沟矿区、蒿坪沟矿区和铁炉坪矿区及它们周围这一银（金）铅（锌）矿床/点密集分布的地区称为铁炉坪-蒿坪沟-沙沟银（金）铅（锌）矿田，也称下峪铅银矿田（支凤岐等，2005）、寨凹地区（刘灵恩等，2005）或铁炉坪银铅锌矿集区（叶会寿，2006）。这一矿田位于河南省洛阳市洛宁县下峪乡境内，大致西起沙沟矿区，东至回春沟，北起北拆离断裂（或洛宁山前断裂），南到太华群和熊

耳群的接触面，东西最长 15km，南北最宽 9km，包含熊耳山北坡西段铁炉坪、蒿坪沟和沙沟三个主要的银（金）铅（锌）矿床和四道沟、西沟、磊磊石等主要的银铅（金）矿点，经纬度坐标为东经 111°15′～111°25′、北纬 34°07′～34°12′，海拔 500～1200m。该矿田位于熊耳山矿集区西段，矿产分带属于小秦岭-熊耳山 Au、Ag、Pb、Cu、Zn 成矿带北亚带，构成秦岭地区最大的银矿集区，初步探明银资源储量约 4000t（毛景文等，2006）。

1956～1957 年，秦岭区域测量地质队二分队在该区进行 1∶20 万区域地质填图，并配有土壤金属测量和重砂测量；1960 年，地质部航磁 902、905 队进行 1∶20～1∶10 万航磁测量，在该区圈出 57-8-1、57-8-2、57-8-3、57-8-4、57-8 等五个航磁异常；1979～1981 年，河南省地质矿产局第一地质调查队在该区进行 1∶5 万区域地质调查，发现多处金、银等矿点；1985～1988 年，河南省有色地质矿产局五队在矿田内进行 1∶5～1∶2.5 万分散流及 1∶1 万次生晕化探工作，圈定出几处 Au、Ag、Pb、Cu、Mo 等化探异常；1990～1993 年，河南有色矿产地质研究所和中南工业大学分别在该带开展科研工作；1986～1995 年，河南省有色地质局六队对铁炉坪银矿床进行地质勘查并提交了勘查报告，评价铁炉坪矿床银为大型，伴生铅为中型；1998 年河南省有色地质局一队提交了蒿坪沟矿区的勘查报告，评价该区银、铅、金分别为中型规模。在过去 20 多年中，胡受奚（1988）、陈旺等（1994）、李忠烈（1994）、郭时然（1995）、彭恩生（1994）、王志光等（1997）、罗铭玖等（2000）、支风岐等（2004）、刘灵恩（2004）、杨群周等（2004）描述了铁炉坪、蒿坪沟和沙沟矿床的地质特征；訾富营（1994）、陈旺等（1995，1996，2003）、隋颖慧等（2000）、徐文忻等（2001）、张巧梅等（2002）和张瑜麟等（2003）论述了这些银铅矿的地球化学和地球物理特点，还通过稳定同位素和流体包裹体研究初步探讨了成矿过程，陈德杰（1996）、徐孟罗等（1997）、燕长海等（2002，2003）、陈衍景等（1992，1998，2003）、郭保健等（1997，2005）、郭保健（2006）、叶会寿（2006）和毛景文等（2003）初步总结了银铅矿的成矿时代、成矿规律和成矿地质背景。

沙沟矿区位于铁炉坪-蒿坪沟-沙沟银（金）铅（锌）矿田的北西部，地理坐标为东经 111°15′～111°16′、北纬 34°09′～34°11′，海拔标高为 500～800m。该矿床是近年来先后由河南省有色地质勘查局、中外合作河南发恩德矿业有限公司（Henan Found Mining Co. Ltd.）探明的大型高品位银铅锌矿床，目前主要矿段 800～450m 标高的勘查程度已达详查，有用组分主要为银、铅、锌，伴生铜、金。已控制的银和铅+锌金属量分别为大型。银和铅共生；锌和铅也多共生，仅在个别矿体中伴生。已探明矿石量 154 万吨，Ag 平均

品位 767g/t，Pb 平均品位 13.24%，Zn 平均品位 4.31%（郑榕芬等，2006）；矿体品位变化系数 Ag 为 40～108%、Pb 为 52～98%、Zn 为 52～129%，有用组分分布属不均匀型。Ag 最高品位 18462g/t，共生 Pb 58.04%，伴生 Zn 0.83%。矿石银品位极高，是一种罕见的工业性矿床（毛景文等，2006）。

1980～1985 年，河南省有色地质矿产局在沙沟西普查区内圈出以银为主的 1/2.5 万分散流异常两个；1986～1992 年，在异常检查工作中，对该区投入少量地表工程，发现地表矿化体；1998～2002 年，在该区发现 7 条较好的含矿断裂，并见工业富矿段；2002～2003 年，在该区开展铅、锌、银多金属资源评价（国土资源大调查项目）和铅、锌、银矿普查（国家资补费项目）。2004～2006 年，河南发恩德矿业有限公司在河南有色地质矿产局普查的基础上，以 S2、S2E、S4、S6、S7、S7-1、S8、S14、S16、S16E 等矿脉为重点，采用坑探和钻探相结合的探矿手段，在沙沟西矿区投入大量工程进行详查，取得突破性进展。支风岐等（2004）首次较详细地对沙沟西矿区进行描述和找矿潜力分析。郑榕芬等（2006）对沙沟银铅矿的矿石矿物组合进行了研究。毛景文等（2006）测定了沙沟矿床蚀变岩中绢云母和铬云母的 ^{40}Ar-^{39}Ar 年龄并探讨了成矿动力背景。

1.3 研究内容、测试方法及完成工作量

1.3.1 研究内容

通过详细描述沙沟银铅锌矿床矿脉、矿体、矿物、矿石结构和构造、围岩蚀变特征，进行成矿阶段划分。在描述各成矿阶段特征的基础上，对各阶段石英、闪锌矿、方解石中流体包裹体进行岩相研究、显微测温和成分分析，并结合 H、O、C、S 稳定同位素分析，讨论各阶段成矿流体的性质、来源，探讨成矿物质的成淀机制，建立矿床成因模型。

1.3.2 测试方法

1、样品的前期处理

对野外采集的样品进行手标本照相之后，选取各矿脉具有代表性的样品在中国地质大学磨片室分别磨制薄片、光薄片和包裹体片。

2、显微观察和照相

在中国地质大学地球科学与资源学院矿床教研室完成，用 OLYMPUS 显微镜鉴定岩矿石名称、矿物组成、结构、构造、分析岩(矿)石的成因。

3、电子探针

主要用于研究岩(矿)石的矿物定名、化学组成、微量元素赋存状态和分布特征研究。

在中国地质大学地学实验中心的电子探针室对部分金属矿物、蚀变矿物进行微区成分分析，仪器型号 EPMA-1600，测试时的实验条件为：加速电压 15kv，电流 7×10^{-10}A。大部分矿物由中国地质科学院矿产资源研究所电子探针组分析，仪器型号 JXA-8800R。

4、流体包裹体

流体包裹体的岩相学特征、均一温度和盐度的测定在中国地质大学（北京）包裹体地球化学实验室进行。使用的仪器为英国产的 Linkan TH 600 冷热台，可测温范围为-196℃～+600℃。在-56.6、0.0 和 374.1℃，系统用人造包裹体进行了校正（Sterner and Bodnar,1984）。石英包裹体气相和液相成分色谱分析由中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室完成。

5、稳定同位素地质学

主要用于示踪成矿流体的来源及其演化规律，为探讨成矿机理提供依据。硫同位素由中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室测定，对挑选出的纯度均达 99%以上的 3 件黄铁矿、2 件闪锌矿和 3 件方铅矿样品以 CuO 作为氧化剂制样，对释放出的 SO_2 进行硫同位素测试。

碳氧氢同位素分析均在国土资源部同位素地质重点实验室 Finningan MAT 251 质谱仪上进行。碳和氧同位素的分析误差为±0.2‰，氢同位素误差为±2‰。对于氢同位素分析，首先使用压碎法把水从流体包裹体中释放出来，然后在 400℃条件下使水与锌反应产生氢气（Coleman et al.，1982），然后用液氮冷冻，收集到有活性炭的样品瓶中。

对于碳氧同位素分析，首先在双目镜下挑选方解石单矿物 5g，纯度达 99%以上。方解石的碳氧同位素分析是在 25℃条件下，使其与磷酸反应释放 CO_2（McCrea, 1950）。用国家一级碳酸盐碳、氧同位素参考物质 GBW04416 和 GBW04417 作为工作标准（Mao et al., 2002b）。GBW04416 的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 和 $\delta^{18}O_{PDB}$ 值分别为 1.61‰和-11.59‰。GBW04417 的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 和 $\delta^{18}O_{PDB}$ 值分别为-6.06‰和-24.12‰。方解石的 $\delta^{18}O_{PDB}$ 值直接从 CO_2 测得，在把 $\delta^{18}O_{PDB}$ 转变为 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 时，使用 Friedman 等(1977)方程：$\delta^{18}O_{SMOW}=1.03086*\delta^{18}O_{PDB}+30.86$。

1.3.3 完成的主要工作量

在硕士三年学习中，作者三次去豫西地区进行矿床地质调查，累计工作日达 160 天，在对豫西小秦岭-崤山-熊耳山-外方山地区的金、银、钼、铅、锌、硫铁矿进行全面调查的基础上，选择沙沟脉状银锌铅银矿地质特征和成矿流体作为研究对象。本文详实地对该矿床的矿田地质、矿脉、矿体、矿物、矿石结构和构造、矿石类型、围岩蚀变、成矿

阶段、矿物生成序列等进行了鉴定、描述。在以上工作的基础上，接着在中国地质大学（北京）教二楼 222 工作室的 Olympus DP12 显微镜上进行了详细的流体包裹体岩相学描述，之后又在包裹体地球化学实验室进行了累计达 30 天的包裹体显微测温。完成的主要工作量见表 1-2。

表 1-2 主要工作量

Table 1-2 Main finished work

工作项目	单位	工作量	工作项目	单位	工作量
阅读文献	篇	>450	阅读著作	部	40
野外工作时间	天	230	野外及室内显微照片	张	>600
野外素描	幅	20	样品采集	件	211
薄片鉴定	件	74	光/薄片	件	112
包裹体片	件	42	电子探针	点	45
产状测量	处	>500	浸蚀鉴定	件	10
单矿物挑选	件	5	包裹体显微测温	个	>400
硫同位素	件	8	包裹体群成分分析	件	3
氢氧碳同位素	件	4	包裹体拉曼分析	件	3

第二章 区域及矿田地质特征

2.1 区域地质概况

熊耳山地区东西长约 80km，南北宽 4~15km，面积约 2000km^2，南以近东西向马超营断裂为界，北以洛宁断裂为界（郭保健等，2005），西接崤山，东连外方山。区内地层可分为上、中、下 3 个构造层：结晶基底岩系为新太古界太华群中深变质岩（绿岩建造）及片麻状花岗岩，盖层为中元古界熊耳群浅变质火山岩及官道口群滨-浅海相含硅质碳酸盐岩；上构造层为在中新生代伸展断陷盆地内发育的红色碎屑沉积岩。

本区发育半地垒式变质核杂岩构造（石铨曾等，2004）。拆离断层沿新太古界太华群结晶基底与上覆中元古界熊耳群盖层的不整合面展布；其中熊耳山北坡的熊耳群沿不整合面发生了显著的拆离，而南坡拆离效应不明显（王志光等，1997；郭保健等，1997）。主要区域性断裂有洛宁山前断裂和马超营断裂。前者为熊耳山区北界，属上拆离盘犁式断裂；后者为熊耳山区南界犁式逆冲断层系，具有长期活动的历史，是豫西地区重要的断裂带。

控矿断裂主要有 NE 向、NNE 向、NNW 向和近 EW 向 4 组，夹持于洛宁山前断裂与马超营断裂之间，组成了本区基本的构造格架。其中 NE 向断裂发育程度最高，分布最广，是矿集区控矿构造的主体方向，控制了区内最为重要的矿床类型-构造蚀变岩型矿床。最重要的褶皱为曹嘴沟复式向斜构造（基地褶皱）和龙脖-花山背斜（盖层褶皱），二者和区域断裂共同控制着花山岩体和寨凹隐伏岩体。龙脖-花山背斜轴向近 EW 向，西起沙沟，东至花山，是区域上主要的褶皱，翼部由熊耳群及外侧的新生界组成，其北翼受区域性山前深断裂破坏而与第三系接触。

区内岩浆活动主要有 3 期：晚太古代为构成本区结晶基底的太华群中基性火山岩及侵入的花岗岩，经区域变质作用已成为各类片麻岩和角闪岩类；中元古代岩浆活动主要为发生在 1800~1650Ma 之间的裂谷型中基-中酸性火山岩；中生代岩浆活动广泛而强烈，大型花岗岩基主要分布于崤山地区中北部，如五丈山岩体[SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄（156.8±1.2）Ma，毛景文等，2005a]；花山岩体[SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄（130.7±1.4）Ma 和（132.0±1.6）Ma，李永峰，2005；毛景文等，2005a]。区内也分布着一些中酸性小斑岩体,与钼矿化密切相关，如雷门沟花岗斑岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为（136.2±1.5）Ma（李永峰，2005），与其南侧的栾川钼矿田 140Ma 左右（SHRIMP 锆石 U-Pb）的燕山期斑岩体形成时代相近（毛景文等，2005a；李永峰，2005）。

区内主要发育热液脉状矿床，主要包括构造蚀变岩型金矿（包括陡倾型，如上宫金矿、公峪金矿、康山金矿；缓倾层间破碎带型，如青岗坪金矿、陆院沟金矿）。构造蚀变岩型银多金属矿（铁炉坪银铅矿、蒿坪沟银铅金矿、沙沟银铅锌矿等)、石英脉型金矿及银铅矿。此外还有浅成低温热液型金矿（隐爆角砾岩型，包括祁雨沟金矿和店房金矿）及斑岩型钼矿（雷门沟）。构造蚀变岩型金、银铅矿是熊耳山地区的主要矿床类型，而石英脉型则相对较少，且多呈构造蚀变岩与石英脉型的过渡类型。

2.2 矿田地质

2.2.1 地层

铁炉坪-蒿坪沟-沙沟银（金）铅（锌）矿田位于熊耳山长条状太华群出露区的西端，内部出露的地层主要为早前寒武纪太华群高级变质岩系。在矿田外围，北部主要出露古近系紫红色砂砾岩、第四系坡积物和黄土，西部和南部主要出露熊耳群火山岩系（图2-1）。

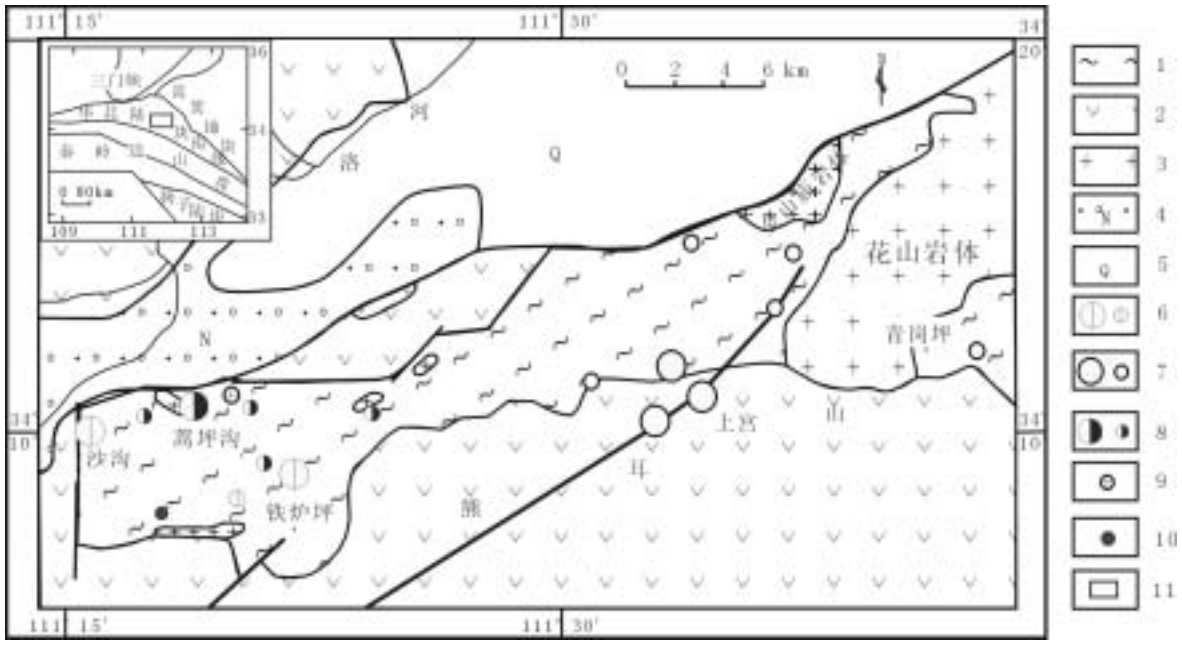

图 2-1　熊耳山地区地质与矿床简图

Fig. 2-1 Geological sketch map of Xiongershan district

1-太华群高级变质岩；2-熊耳群火山岩；3-中酸性岩浆岩；4-古近系砂砾岩；5-第四系砾石；6-银铅矿床(点)；7-金矿床(点)；8-银金铅矿床(点)；9-铜矿点；10-钼矿点；11-研究区

太华群 为一套含铁镁质和超铁镁质岩块的高级变质岩系，岩性主要为斜长角闪岩、黑云（角闪）斜长片麻岩（图版 1-3），夹有角闪岩团块或透镜体，构成本区结晶基底，同时构成熊耳山变质核杂岩（王志光等，1997；石铨曾等，2004）。黑云（角闪）斜长片麻岩普遍具混合岩化现象，可见条带状混合岩和眼球状混合岩。矿田内沙沟银铅锌矿、

铁炉坪银铅矿、蒿坪沟银铅金矿均赋存于其中。

中元古界熊耳群 不整合地覆盖于太华群之上，为一套中基性-中酸性火山岩，主要岩性为紫红色-灰黑色玄武安山岩、安山（玢）岩（图版 1-6）、英安岩、流纹（斑）岩、火山角砾岩和火山碎屑岩，总厚度为 4066～6297m。地层走向近 EW，倾向南，倾角 26°～42°，位于区域性花山-龙脖背斜的南翼。熊耳群也是熊耳山地区金、银等金属矿产的重要容矿围岩，如上宫金矿、康山金矿即产于该地层中。

古近系 分布于矿田外围洛宁山前断裂（或北拆离断层）北侧，是一套山间盆地磨拉石建造，主要由红色砂砾岩（图版 1-5）、含粘土砂岩组成。在距离红层和片麻岩接触带不远的地方，常见红层以较陡的角度向北拆离断层面倾斜。另外，近年来豫西红层中多处发现恐龙蛋化石，因此，这些红层可能部分为晚白垩世地层。

第四系 分布于洛宁山前断裂北侧、矿田内的现代沟谷或地势较高处，由砾石、砂、亚砂土、砂质粘土等组成（图版 1-7），可见含方铅矿细脉的脉石英砾石，在洛河阶地及沟谷中存在砂金。

2.2.2 岩浆岩

矿田周围有中元古界熊耳群英安岩、安山岩、安山玢岩、玄武安山玢岩等，外围北东 20 多公里处出露有中生代花山、五丈山和金山庙花岗岩体。矿田内部岩浆岩除出露太华群基性-超基性岩外，还发育有侵入其中的中生代白垩纪花岗斑岩-隐爆角砾岩体及花岗斑岩脉，如蒿坪沟花岗斑岩-隐爆角砾岩等。另外，侵入太华群中的岩浆岩还有变辉长岩、变辉绿岩、辉绿岩、辉长岩、长英质伟晶岩等岩体或岩脉，如矿田中部有一变辉长岩体，这些岩浆岩的侵入次序及年代缺乏详细的研究。

表 2-1 蒿坪沟花岗斑岩微量元素含量

Table 2-1 Trace elements of phyric granite, Haopinggou

样品号	岩石名称	分析结果(单位：Au 为 10^{-9}，其它为 10^{-6})																		
		W	Mo	Sn	Cu	Pb	Zn	Cd	As	Sb	Bi	Ni	Co	V	Ti	Mn	Be	Cr	Ag	Au
AgT541	花岗斑岩	272	0.9	3.8	333	278	162	1	5.8	1.4	0.56	49	36	50	1490	850	1.2	106	0.89	5.5
AgT542	花岗斑岩	325	0.5	5	206	717	120	1	2.9	0.84	1.25	15	44	35	2120	710	1.6	22	0.50	5.7
AgT543	花岗斑岩	75	2.1	4	54	68	98	1.2	2.6	0.34	0.54	14	25	42	1490	963	1.6	29	0.13	4.3
AgT544	花岗斑岩	144	0.5	4	162	97	130	1	2.5	0.55	0.42	14	29	30	1440	571	1.3	30	0.21	3.5
AgT545	花岗斑岩	144	0.6	3.9	18	49	52	0.5	2	0.42	0.41	13	12	35	1090	1170	1.1	30	0.11	3.1
AgT546	花岗斑岩	250	0.8	5	30	79	102	1	1.8	0.26	0.21	7	24	25	1640	1030	4.2	15	0.07	12.7
平均值		202	0.9	4.3	134	215	110	0.95	2.9	0.64	0.57	18.7	28	36	1545	882	1.8	39	0.32	5.8
地壳元素丰度		1.3	1.1	2.5	47	16	83	0.13	1.7	0.5	0.009	58	18	90	4500	1000	3.8	83	0.07	4.3
酸性岩平均含量		1.5	1	3	20	20	60	0.1	1.5	0.26	0.01	8	5	40	2300	600	5.5	25	0.05	4.5
对地壳浓集系数		155	0.8	0.2	2.9	13.4	1.3	7.3	1.7	1.3	63	0.3	1.6	0.4	0.3	0.9	0.5	0.5	4.6	1.35
酸性岩浓集系数		135	0.9	1.4	6.7	10.8	1.9	9.5	1.9	2.5	57	2.4	5.6	0.9	0.7	1.5	0.3	1.6	6.4	1.3

蒿坪沟斑岩体出露于洛宁县下峪乡蒿坪沟口，为一小岩株，呈不规则椭园状，出露

长度约 2000m，宽 300～400m，出露面积约 0.8km^2，岩性主要为花岗斑岩。据岩石地球化学特征和岩体继承锆石年龄分析，其应属中下地壳物质重熔形成的花岗岩体（叶会寿，2006）。其金含量为 3.1×10^{-9}～12.7×10^{-9}，银为 0.07×10^{-6}～0.89×10^{-6}，铅为 497×10^{-6}～717×10^{-6}，锌为 52×10^{-6}～162×10^{-6}（王志光等，1997）。相对酸性岩浓集系数，铅为 10.8，银为 6.4，锌为 1.9，金为 1.3，说明本岩体已具备较好的成矿物质基础，具体见表 2-1。爆破角砾岩体出露于蒿坪沟斑岩体东南部，平面呈长条状，沿北西走向长 750m，宽 50～130m，产状陡立，角砾成份复杂，除太华岩群片麻岩和熊耳群玄武安山岩外，还有花岗斑岩、辉绿岩等。斑岩与爆破角砾岩应为同一期次不同阶段的产物。

遥感、物探、地球化学资料均显示矿田深部存在隐伏花岗质岩体（张天义等，1997），而且钻孔在 525m 深处见到花岗岩体（袁跃清等，2005），蒿坪沟花岗斑岩体及花岗岩脉则是其浅部的反映。一般认为燕山晚期中酸性岩浆岩与该区成矿关系最为密切，控制着本区银、金、铅、锌等矿床（点）、异常的分布。张瑜麟（2001），支凤岐等（2004）将熊耳山北坡金属矿床分为以花山岩体为中心的东部金矿田和以碾盘沟南侧的寨凹隐伏岩体为中心的西部下峪银（金）铅（锌）矿田。

2.2.3 构造

2.3.3.1 矿田内主要构造

熊耳山北坡铅银矿床（点）主要集中于龙脖-花山背斜西段轴部，尤其是次一级的草沟背斜轴部及其附近（胡受奚等，1988）。矿田内片麻理一般走向 NNE-NE，倾向 SEE-SE，倾角 45°～60°，局部可见到层间小揉皱，其轴向产状与片麻理产状基本一致。

除发育山前断裂外，在太华群与熊耳群地层接触附近发育规模较大的拆离断层带，其产状平缓，由强烈片理化的韧性剪切带、微角砾岩带、绿泥石化碎裂岩带及脆性正断层组成（石铨曾等，2004）。主拆离断层面位于太华群与熊耳群或新生界沉积之间的不整合面附近，太华群构造层组成变质核杂岩核心，中元古界熊耳群及新生界构造层构成盖层。北拆离断层规模最大，岩石蚀变强烈，拆离断层带内 Au、Ag 等成矿元素富集系数较高（郭保健等，1997）。

NE 向断裂：长数百米到十多公里，倾向 NW 或 SE，倾角陡，是矿田内主要的容矿构造，呈带出现，自西向东依次有蒿坪沟构造带、龙王庙-岳坪沟构造带、上宫-八百坡构造带和青岗坪构造带。

2.3.3.2 沙沟矿区主要构造

断裂构造发育，根据走向总体上可分为三组断裂，以 NNE-NE 为主，近 SN 和近 EW

次之。破碎带均具分枝复合、膨大缩小，厚度变化大的特点。

NNE-NE 向断裂 为矿田内主要的容矿断裂，近平行成群出现；单条断裂带长度一般<3000m，宽度 0.5～10.5m，一般 1～2m；总体走向 NNE-NE，倾向 NWW-NW，倾角 60°～85°；平面和剖面上均波状延伸；常见分枝复合、膨大缩小、局部直立或局部反倾斜现象；多阶段活动特征明显，力学性质总体表现为为压剪-张（剪）-压剪。断裂内常见的构造岩有断层泥、碎裂岩、构造挤压片岩，这些构造岩均发生不同程度的蚀变。

近 EW 向断裂 也较发育，但并不密集分布，倾角陡，多被基性岩脉或石英-黄铁矿脉所充填，银铅锌矿化较弱，如沙沟西矿区 S17 石英-黄铁矿脉。另外，在矿区南部寨凹地区，近 EW 向构造中存在蚀变岩型辉钼矿矿体。

近 SN 向断裂 数量不多，一般向东倾，倾角 50°～70°，多阶段活动特征明显。例如，沙沟西矿区含矿性很好的 S16 号矿脉，地表出露长 1600m，宽 3～15m；在 S16 分支为 S16E 和 S16W 的附近，其左行走滑错断宽为 3～3.5m 的近 EW 向基性岩脉。

在沙沟矿区内除上述断裂发育外，节理和小裂隙也十分发育，多组节理、小裂隙相互穿切、交错，一般它们对矿体无大的破坏。其中较发育的几组节理的产状分别为 272°～285°∠61°～73°、286°～300°∠68°～88°和 1°～19°∠52°～85°等。较发育的两组小裂隙的产状分别为 290°～316°∠60°～85°和 115°～127°∠70°～85°，这两组小裂隙走向一致，倾向相反，为共轭裂隙，可以确定这时最大主压应力方向约为 30°。

2.2.4 矿田矿床（点）空间分布

熊耳山北坡分东西两个矿带，分别为以上宫-青岗坪为代表的金矿田（东带）和以铁炉坪-蒿坪沟-沙沟-康山为代表的银（金）铅（锌）矿田（西带）。东、西矿带分别以东部的花山花岗岩体和西部的碾盘沟隐伏岩体为中心，受四组 NE 向断裂控制，沿岩体的外接触带形成矿化集中区。矿田内矿床主要有铁炉坪银铅矿床、蒿坪沟银金铅矿床和沙沟银铅锌矿床，这三个矿床均属于薄脉状硫化物石英脉-蚀变破碎岩（带）型矿床；主要的矿点有四道沟银铅矿点、西沟银铅矿点、磊磊石金矿点、寨凹钼矿点。矿田东为围绕华山等岩基的金矿田，有上宫、青岗坪、祁雨沟爆破角砾岩型、公峪、瑶沟、干树沟、虎沟、吉家洼、松里沟、陈吴子沟、柿树底等金矿床。

第三章 沙沟脉状银铅锌矿床地质特征

3.1 矿化蚀变破碎带及矿体特征

3.1.1 矿化蚀变破碎带特征

在沙沟矿区，已发现的矿化蚀变破碎带（又称矿脉）有 30 多条（编号为 S1、S2、S3 等），大致呈等间距（50～100m 或 100～200m）近平行地分布于南北长 3.5km、东西宽 3km 的范围内。单脉出露长度 300～3000m，其中 S7、S8 两条达 3000m，S6、S14、S16 三条矿脉>1000m；宽 1～15m；延深数百米。多数总体走向 NEE-NE，个别近 SN（如 S16 和 S16E），倾向多为 NW，倾角为 50°～85°。现已发现工业矿体的矿脉有 11 条，自西向东依次为 S2、S4、S6、S14、S16、S16W-1、S16E、S21、S7、S7-1、S8，这些矿脉主要分布于矿区 NW 侧 4km^2 的范围内（图 3-1）。

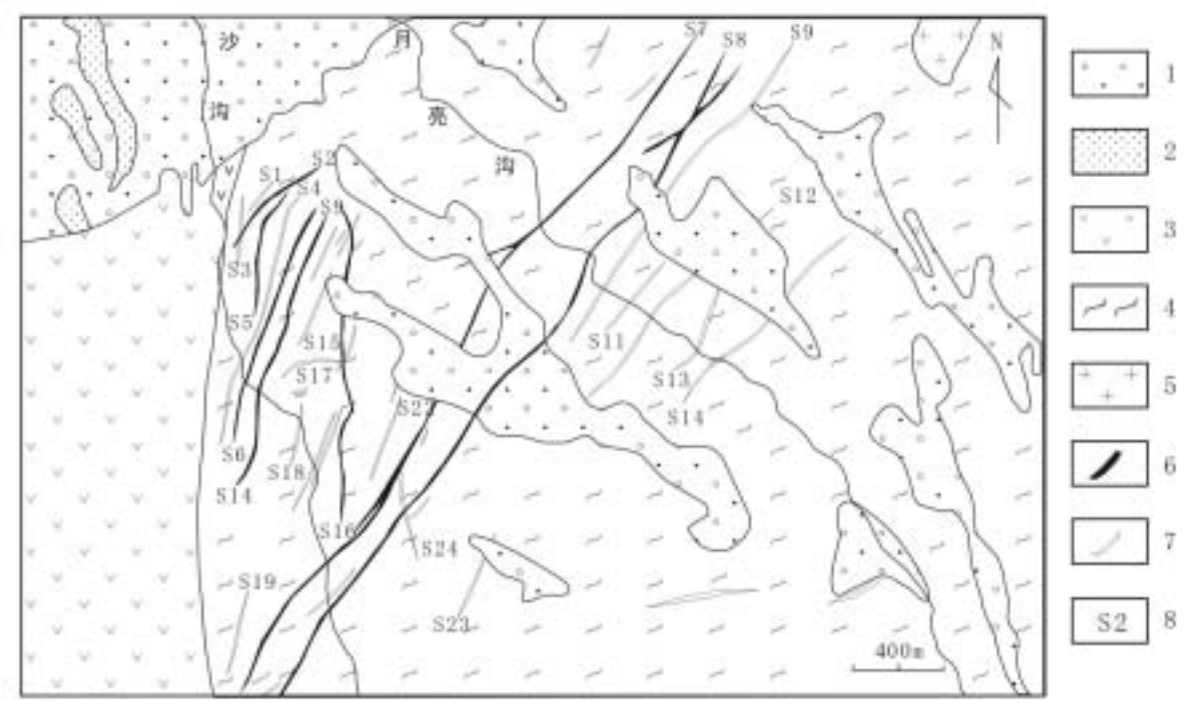

图 3-1 沙沟银铅锌矿床主要矿脉分布简图（据河南发恩德矿业有限公司，2005）

Fig3-1 Distribution of Ag-Pb-Zn ore veins in the Shagou ore deposit

1-太华群高级变质岩；2-熊耳群火山岩；3-中酸性岩浆岩；4-古近系砂砾岩；5-第四系砾石；6-矿脉；7-未发现矿体的蚀变带；8-岩性界线；9-矿脉编号

1-Archean gneisses; 2-Proterozoic volcanic rock; 3-Mesozaic granite; 4-Tertiary sediments; 5-Quaternary sediments; 6-vein; 7-non-mine alteration zone; 8-lithology borderline; 9-vein number

矿化蚀变破碎带具有以下特征：（1）形态、产状、分布和规模等和断裂关系密切；（2）在平面上，大致呈等间距成群成带分布，总体显示两头小中间大，有向北东、南西两端收敛之趋势；（3）矿化带产状与破碎带产状一致，在平面和剖面上均呈 S 形延伸，

分枝复合和膨缩现象常见；(4) 矿化主要集中在破碎带内，破碎带中央为成矿热液活动的中心，宽数十厘米到两米，是矿化和蚀变的最强部位，主要由石英-碳酸盐-绢云母-(铬)白云母蚀变岩、硫化物（硫盐）-石英脉、石英脉、含铁白云石细脉构成。(5) 破碎带本身矿化强弱不均匀，在强蚀变地段、特定构造部位形成工业富矿体；矿脉地表品位较低，往下品位明显增高，厚度增大；就单矿脉而言，不同地段厚度、品位的变化也比较大；(6) 与围岩多呈断面接触；一般在断裂面附近或破碎带的中间部位，岩石破碎程度较高；破碎带内部以角砾、碎裂构造为主，角砾多呈次棱角状、透镜状，局部可见构造片岩；在矿体处，破碎带底板常出现构造片岩，破碎带顶板往往为剪切断面。(7) 矿化形式主要为充填作用，指示成矿作用发生在空间较宽松、压力较低的部位；(8) 常被小裂隙错开，但错开的距离很小；(9) 浅色蚀变岩的厚度和矿体的规模正相关；(10) 根据断裂面结构及岩石矿物定向排列现象，在成矿前断裂主要表现为压剪性；根据矿石结构，在成矿时构造主要表现为张性；根据块状矿石中的蚀变岩被压成透镜体和 S7 矿石被压碎成泥状，在成矿后构造主要表现为压剪性；第四系以来的活动构造主要表现为张性。

3.1.2 矿体特征

在 7 条主要矿脉内已初步圈出矿体 19 个，分别编号为 2-I、2-II、6-I、6-II、14-I、14-II、16-I、16-II、16-III、16E-I、16E-II、7-I、7-II、7-III、8-I、8-II、8-III、8-V、8-VII。矿体具有以下特征：(1) 银、铅品位在矿体中间高，两端低，呈正态分布，铅品位高处银品位也高，并且变化范围很大；锌品位变化规律性较差，锌品位高时银、铅品位不一定高。(2) 赋存于高级变质基底内的 NE-NNE 或 SN 向断裂中，形态和产状受容矿断裂所控制，且主要位于破碎带下盘附近。(3) 形态以不规则脉状、透镜状为主，长度 50～200m，宽度 0.5～4.0m，斜深 20～80m，产状 280°～325°∠50°～80°或 80°～100°∠60°～85°。(4) 与围岩界限较清楚，轮廓可以用肉眼大致圈定，分布一般不超出容矿构造面。(5) 连续性差，矿体之间存在明显的无矿段，常侧伏斜列。(6) 厚度沿着走向和倾向变化均较大，分枝复合、膨大缩小、尖灭再现特征明显；而且，在矿脉产状变化部位、复合部位、变宽部位和交叉部位易形成厚而富的矿体，与主脉相交的支脉往往与主脉共同构成工业矿体。(7) 富矿体中常见蚀变岩或石英夹块。(8) 主要分布在矿区北部和中部，南部矿化差。(9) 具有地表薄且贫，向下变厚变富，向深部又变薄变贫的趋势。(10) 一般富集规律：当矿脉产状变化大，倾角在 60°～80°之间，容易出现富矿段；在破碎带变宽或分枝复合部位常有富矿体出现；在靠近断裂带下盘，碎裂构造发育且伴有角砾状构造时，会出现相对厚大的透镜状富矿体；若产状稳定，破碎带厚度相对较小，矿体形

态多呈薄脉状。

表 3-1 沙沟矿床主要矿脉特征

Table 3-1 Characteristics of the main veins, Shagou ore deposit

矿脉编号	总体走向	倾向	出露长/M	破碎带宽/M	含矿段长/M	含矿段厚度/M		含矿段平均品位			矿体编号	矿石类型	矿化阶段
						范围	平均	AG/10^{-6}	PB/%	ZN/%			
S2	NNE	NWW	1100	3.0~6	400	1.0~2.5	1.8	700	8.5	2.6	2-I、2-II	I、II	II_1、II_2
S6	NNE	NWW	1100	0.7~3	800	0.6~1.2	0.8	600	6.9	4.0	6-I、6-II	I、II	II_2
S14	NNE	NWW	1400	2.0~10	800	0.3~1.8	1.2	400	2.8	1.4	14-I、14-II	I	II_2
S16	近 SN	E	1600	5.0~15	500	0.6~2.2	1.4	400	3.0	4.5	16-I、16-II、16-III	I、II、III、IV	II_1、II_2
S16E	近 SN	E	900（隐伏）	2.0~10	500	0.6~2.5	1.0	500	9	5.5	16E-I、16E-II	I、II、III、IV	II_1、II_2
S7	NE	NW	3000	2.5~15	1400	0.5~1.5	1.0	200	4.4	3.5	7-I、7-II、7-III	V	II_1、II_2
S8	NE	NW	3000	2.5~8	2000	1.0~1.50	1.2	229	6.2	-	8-I、8-II、8-III 等	I、II	II_1、II_2

注：据支凤岐等（2004）资料及作者野外观测资料整理而成，矿石类型和矿化阶段代号见正文相应部分

表 3-2 沙沟矿床部分矿体特征

Table 3-2 Characteristics of some orebodies, Shagou ore deposit

矿体编号	产状	长/M	厚/M	控制深度/M	矿体平均品位			估算资源量 331+ 332+333			工程控制标高/M	备注
					AG/10^{-6}	PB/%	ZN/%	AG/T	PB/T	ZN/T		
2-I	285~315 °∠60~90 °	254	0.9	140	223	2.9	3.4	-	-	-	500	自然银含量相对高
6-I	285~310 °∠60~80 °	180	0.7	180	281	4.9	4.2	-	-	-	520	Zn 含量相对高
14-I	282~320 °∠60~90 °	820	1.2	390	185	3.8	1.3	60	12000	4200	350	充填特征明显
16-I	60~100 °∠45~72 °	850	1.1	250	270	6.2	3.6	110	24000	14000	510	两侧铬云母相对发育
16E-I	65-105 °∠70-85 °	250	1.0	250	595	9.2	5.7	-	-	-	550	两侧铬云母相对发育
7-1	285~315 °∠75~84 °	360	0.9	350	80	2.5	1.5	-	-	-	570	构造对矿石破碎严重
8-1	300~325 °∠65~85 °	310	1.0	170	275	3.0	2.8	-	-	-	570	ZN、CU 含量相对高

注：据河南发恩德矿业有限公司资料及作者野外观测资料整理而成

3.2 矿石特征

3.2.1 矿物组成

在原生矿石中矿石矿物主要为方铅矿（图版 2-1）、闪锌矿（图版 2-4），其次为黄铁矿、黄铜矿、含银黝铜矿、硫锑铜银矿、浓红银矿、辉银矿、自然银、黝铜矿、磁铁矿、斑铜矿、毒砂、磁铁矿等；脉石矿物主要有石英、碳酸盐矿物（方解石、菱铁矿-菱铁镁矿、含铁白云石）、绢云母、（铬）白云母，其次有斜长石、绿泥石、角闪石、黑云母、锆石、金红石、磷灰石等；表生矿物有褐铁矿、硬锰矿、白铅矿、铅矾、针铁矿、黑锌锰矿、赤铁矿、孔雀石、铜蓝、蓝铜矿、高岭石等。不同种类矿石的矿物含量变化较大。河南省有色金属地质勘查总院（2005）对沿脉坑道回收的矿石进行了选矿试验，主要矿物含量为方铅矿 5.2%、闪锌矿 1.2%、白铅矿 0.1%、黄铜矿 0.1%、黄铁矿 3%、斜长石 30%、石英 25%、碳酸盐 22%、绢云母 5%、黑云母 2%、绿泥石 2%、角闪石 1%、其它 3.4%。

3.2.1.1 矿石矿物

方铅矿（PbS） 是最主要的矿石矿物，普遍存在于各条矿脉中，其不仅是铅的主要来源，而且是银矿物的主要寄主矿物。以脉状、块状、囊状或（细脉）浸染状集合体产出。它形、半自形或自形，解理发育，部分发生塑性变形，其三角孔穴呈曲线状分布。可分为粗粒（图版 4-1）、中-细粒（图版 4-2）、微粒（图版 4-3、4-4）三种。以中-细粒方铅矿为主，含少量的粗粒和微粒方铅矿。常见方铅矿溶蚀闪锌矿(图版 9-2)、黄铁矿(图版 9-4)、石英（图版 9-1），也可见方铅矿交代含银黝铜矿（图版 9-7）。粗粒方铅矿含量较少，自形或半自形粒状，多沿脉壁呈不规则细（网）脉状生长，为原地结晶形成，结晶往往较早，其中常见含银黝铜矿；中粒和细粒方铅矿常一起呈脉状、条带状、囊状或（细脉）浸染状集合体产出，它形或半自形粒状，颗粒之间常分布有石英、闪锌矿、黄铁矿等，集合体中常见的银矿物有含银黝铜矿（图版 5-6）、硫锑铜银矿（图版 5-1）、浓红银矿（图版 5-3）、自然银等；微粒方铅矿含量也较少，呈（网）脉状、团块状产出，在某些矿石中明显可见微粒方铅矿穿插中-细粒方铅矿。在 S16、S14 等矿脉局部地段，方铅矿被压扁呈片状，其集合体呈条带状排列。S14 方铅矿条带方向与矿脉延伸方向一致；S16 方铅矿条带方向垂直于矿脉走向，线理产状为 80°～90°∠54°～66°（图版 4-2）。方铅矿的 7 个电子探针分析结果(郑榕芬，2006)为：Ag 0.10～0.40%，平均值 0.19%。4 个方铅矿单矿物的微量元素化学分析（表 3-1）平均含 Zn 0.34%、Cu 0.10%、

Sb 0.23%、Ag 0.20%、Fe 0.06%、As 0.0042%。从分析结果来看，单矿物中明显混有银的硫盐矿物。分散元素 Cd 的含量为 15.70～36.40($\times10^{-6}$)；Ga、Ge、Se 的含量低；Sb/As 为 55，富 Sb 而贫 As。

表 3-1　方铅矿单矿物微量元素分析结果（郑榕芬等，2006）

Table 3-1 Trace elements of galena, Shagou deposit

样　号	采样位置	粒　度	Fe%	Zn%	Sb%	Ag%	Cu%
27	CM102-S16W-NYM-570-190m	细粒	0.09	0.076	0.27	0.21	0.16
161	CM102-S16W	中粒	0.04	0.42	0.13	0.15	0.07
23	CM102-S16W-NYM-570-190m	中粒	0.09	0.85	0.32	0.21	0.11
71	CM103-S14	粗粒	0.04	0.01	0.20	0.21	0.05

10^{-6} 样　号	Mn	Bi	Ba	Cd	In	Ga	Tl	As	Te	Ge	Se
27	2.92	0.49	＜1	36.00	0.92	0.06	0.50	94.80	0.51	＜0.1	0.23
161	6.42	4.62	＜1	36.40	1.70	0.12	0.23	22.20	0.51	＜0.1	12.30
23	2.57	0.50	＜1	59.40	10.10	0.25	0.71	12.20	0.29	＜0.1	0.88
71	17.6	2.30	＜1	15.70	0.57	0.04	0.28	39.40	0.73	＜0.1	3.04

注：由国家地质实验测试中心分析；分析方法：Mn、Zn、Ag、Bi、Cd、In、Ga、Tl、Te、Ba、Ge 为等离子质谱，Fe、Cu、As、Sb 为等离子光谱，Se 为原子荧光。

闪锌矿(ZnS) 不及方铅矿发育且分布不均匀，手标本呈褐或浅黄色，褐色为主。反射色棕灰色，内反射黄棕色，均质体，半-自形或它形。在该矿床中闪锌矿可以分为三类：（1）呈条带或（细）脉状产出的褐色闪锌矿（图版 7-1），粗-中粒，半-自形，较常见；（2）分布于中-细粒方铅矿集合体中的浸染状或团块状中粒闪锌矿，这种闪锌矿多呈短柱状，长轴一般为 0.17～1.5mm，与黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、含银黝铜矿等共生（图版 10-6），未见磁黄铁矿与其共生，常被方铅矿交代；(3）呈细脉或梳状产出的浅黄色闪锌矿（图版 7-3），含量较少，常见生长环带结构，可见少量 2～4μm 的气液两相包裹体(图版 13-7)，可以穿插 (1) 类闪锌矿。闪锌矿中常见叶片状、乳滴状黄铜矿（图版 9-5），也可见细脉（图版 7-5）或不规则状黄铜矿集合体。与方铅矿共生的闪锌矿的 Cu 含量为 0.00～0.21%，Fe 含量为 0.03～1.71%，含 Fe 量较低。

黄铁矿(FeS_2) 主要产于石英-黄铁矿阶段，其赋存形式有以下几种：(1）呈石英+黄铁矿脉分布于近 EW 向断裂中（图版 10-1），其黄铁矿颗粒或裂隙之间充填有少量方铅矿；(2）分布于围岩节理或小裂隙中的细脉（0.5~4cm）状黄铁矿；(3）在近矿脉蚀变岩中，多呈中-细粒它-半自形星点状集合体分布在非金属矿物中；(4）产于 NE-NNE 向（如 S8）和近 SN 向（如 S16）矿脉中的不规则细脉状或团块状黄铁矿集合体，在 S8 更常见；(5）呈星点状分布于早阶段白色石英脉中的自-半自形粗粒黄铁矿，粒径 0.2~0.5cm，个别可达 1~2cm；(6）块状或稠密浸染状方铅矿中的黄铁矿，进一步可分为两种，一种呈半自形-自形，长轴 0.02～1.3mm，常见碎裂结构，被方铅矿或闪锌矿交代形成溶蚀结构

（图版 8-5）或骸晶结构（图版 9-4），与闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、含银黝铜矿等伴生（图版 10-6）；另一种呈细脉状集合体穿插于方铅矿或闪锌矿集合体中。黄铁矿多被闪锌矿、方铅矿交代（图版 9-3），常见交代骸晶结构。在矿化过程中，所沉淀的黄铁矿较少，黄铁矿的大量沉淀发生在矿化之前。

黄铜矿($CuFeS_2$) 在 S8 中分布最多，S16 次之，分布不均匀。可含有少量的含银黝铜矿细脉和包体。其产出方式有：(1) 呈乳滴状、叶片状分布于闪锌矿（图版 9-5）或者含银黝铜矿中（图版 6-3），长轴 0.002～0.01mm，属微粒；(2) 与方铅矿 、含银黝铜矿等共生（图版 5-8，6-5），呈它形粒状集合体分布于闪锌矿、方铅矿和脉石矿物颗粒之间，呈椭圆状、次圆状，长轴 0.2～1.0mm；(3) 呈不规则细脉穿插闪锌矿、方铅矿、含银黝铜矿（图版 6-4）。

毒砂 (FeAsS) 相对前面几种矿物，含量要少得多。亮白色，楔形晶体，细粒（图版 4-8）。毒砂中的银低于检测限。

磁铁矿（Fe_3O_4） 含量少，反射色灰带棕，均质体，它形，与黝铜矿共生（图版 4-7）。

含银黝铜矿（Cu，Ag）$_{10}$（Fe，Zn）$_2$（Sb，As）$_4$（S，Te，Se）$_{13}$ 是该矿床含量最多、分布最广泛的银矿物，在方铅矿集合体中普遍存在。反射色灰白，带有浅橄榄绿色调，均质性。呈它形粒状，常为柱状、乳滴状、纺锤状、圆状、次圆状、椭圆状、环状、长条状等，长轴 0.03～0.15mm，属细粒。多数呈单粒（图版 6-1、6-7、6-8）或成群（图版 6-2）分布在方铅矿颗粒之间或方铅矿与闪锌矿、石英等的接触部位，可见其呈线状排列分布于中粒方铅矿集合体中；少数呈乳滴状分布在黄铜矿中，或呈细脉状穿插于方铅矿中或单独分布在脉石矿物之中。可与方铅矿、黄铜矿、闪锌矿、石英共生。含银黝铜矿可穿插闪锌矿；可以被方铅矿交代或交代方铅矿呈镶边结构（图版 6-4）；也可以被黄铜矿穿插或交代呈镶边结构（图版 9-6）。含银黝铜矿氧化后可以生成硫锑铜银矿、辉银矿、辉铜矿等矿物。平均晶体化学式为（$Cu_{7.48}Ag_{2.49}$）$_{9.97}$（$Zn_{1.42}Fe_{0.36}$）$_{1.78}$（$Sb_{3.74}As_{0.36}$）$_{4.10}(S_{12.82}Te_{0.18})_{13}$。

黝铜矿 本矿床中的黝铜矿族矿物主要为含银黝铜矿，黝铜矿含量少。反射色灰白色（带有浅褐色），均质性，它形粒状，与黄铜矿、方铅矿、含银黝铜矿、石英等共生（图版 6-5、6-6）。

硫锑铜银矿（$(Ag,Cu)_{16}Sb_2S_{11}$） 反色率较含银黝铜矿低，灰白色带绿色调，多色性微弱，强非均质性，内反射深红色（微弱）。长轴 0.2～1.0mm，与含银黝铜矿、浓红银矿相比其颗粒一般较大。主要呈它形粒状分布于方铅矿颗粒之间或方铅矿、闪锌矿接触

部位，另外，可见少量硫锑铜银矿穿插在方铅矿裂隙中呈裂隙银。平均晶体化学式为 $(Ag_{14.67}Cu_{1.58})_{16.25}(Sb_{1.88}As_{0.03})_{1.91}S_{11}$。

浓红银矿（Ag_3SbS_3） 浅蓝灰色，多色性不明显，强非均质性，内反射深红色。呈乳滴状（图版 5-3,5-5）、长条状、不规则粒状分布于方铅矿集合体中或沿方铅矿解理分布，长轴 0.015～0.1mm。

自然银（Ag） 为亮白色、高反射率，性软。呈不规则状、细脉状分布于方铅矿集合体中，硫锑铜银矿中也可见极少的自然银。在 S2 块状方铅矿集合体中常见针状、丝状自然银，含量变化较大。

辉银矿(Ag_2S) 含量少。反射色灰白带绿，低反射率，均质体。呈不规则细粒状，长轴 0.02～0.08mm。沿方铅矿或闪锌矿的解理或微裂隙产出。虽然银矿物与硫化物共生，但银矿物主要为银的硫盐矿物，银的硫化物含量很少。

表 3-2 沙沟矿床银矿物的电子探针分析结果(wt%)（郑榕芬等，2006）

Table 3-2 Eectron probe microanalysis of silver-bearing minerals, Shagou deposit

矿物	样号	As	Sn	S	Cu	Sb	Ag	Fe	Ni	Zn	总和
黝铜矿	85-1	2.61	-	24.65	36.29	24.21	5.98	0.46	0.40	5.15	99.75
黝铜矿	85-2	1.76	-	23.95	36.28	26.54	3.06	0.56	-	6.04	99.49
含银黝铜矿	39-2-1	1.14	0.61	23.43	27.86	26.94	12.57	0.40	-	6.47	100.01
含银黝铜矿	8-3	1.38	-	23.09	24.37	24.35	18.34	0.26	0.65	5.79	100.07
含银黝铜矿	159	0.87	-	24.09	31.41	27.16	9.05	0.31	0.52	5.12	99.14
辉银矿①	24-3	0.18	-	12.94	0.31	-	84.80	-	0.02	0.79	99.29
浓红银矿	161-2-2	0.43	0.07	17.43	0.13	22.05	58.94	0.02	0.01	0.01	99.09
浓红银矿	161-2-1	0.31	0.08	17.20	0.12	22.24	60.03	0.01	0.03	-	100.02
硫锑铜银矿	161-1-2	0.16	0.04	15.20	2.58	9.89	71.60	0.01	-	0.01	99.49
硫锑铜银矿	13-2	0.11	0.01	15.76	6.30	10.31	67.14	-	0.06	0.03	99.72

矿物	样号	采样位置	化学分子式
黝铜矿	85-1	CM102-S8-NYM-570	$(Cu_{9.66}Ag_{0.94})_{10.60}(Zn_{1.33}Fe_{0.14})_{1.47}(Sb_{3.36}As_{0.59})_{3.95}S_{13}$
黝铜矿	85-2		$(Cu_{9.81}Ag_{0.49})_{10.30}(Zn_{1.59}Fe_{0.17})_{1.76}(Sb_{3.74}As_{0.40})_{4.14}(S_{12.82}Te_{0.18})_{13}$
含银黝铜矿	39-2-1	CM102-S16W -NYM-570	$(Cu_{7.77}Ag_{2.06}Sn_{0.09})_{9.92}(Zn_{1.75}Fe_{0.13}Co_{0.04})_{1.92}(Sb_{3.92}As_{0.27})_{4.19}(S_{12.95}Te_{0.05})_{13}$
含银黝铜矿	8-3		$(Cu_{6.79}Ag_{3.01})_{9.80}(Zn_{1.57}Fe_{0.08}Ni_{0.20})_{1.86}(Sb_{3.54}As_{0.32})_{3.86}(S_{12.74}Te_{0.26})_{13}$
含银黝铜矿	159		$(Cu_{8.53}Ag_{1.44})_{9.97}(Zn_{1.37}Fe_{0.10}Ni_{0.15}Co_{0.11})_{1.73}(Sb_{3.86}As_{0.2})_{4.06}(S_{12.95}Se_{0.05})_{13}$
辉银矿	24-3		$(Ag_{1.95}Zn_{0.03}Cu_{0.01})_{1.99}S$
浓红银矿	161-2-2		$(Ag_{3.02}Cu_{0.01})_{3.03}(Sb_{1.00}As_{0.03})_{1.03}S_3$
浓红银矿	161-2-1		$(Ag_{3.11}Cu_{0.01})_{3.12}(Sb_{1.02}As_{0.02})_{1.04}S_3$
硫锑铜银矿	161-1-2		$(Ag_{15.48}Cu_{0.94})_{16.34}(Sb_{1.88}As_{0.05})_{1.93}S_{11}$
硫锑铜银矿	13-2		$(Ag_{13.93}Cu_{2.22})_{16.15}(Sb_{1.88}As_{0.02})_{1.90}S_{11}$

银含量很高，而且嵌布在方铅矿集合体中的银矿物的种类多，是本类型矿床的一个重要特征。沙沟矿床银主要以独立银矿物的形式产出，在原生矿石中独立银矿物主要为

含银黝铜矿、硫锑铜银矿、浓红银矿、辉银矿、自然银，含银黝铜矿含量最多、最常见，其次是硫锑铜银矿和浓红银矿。方铅矿是银的主要载体矿物，银矿物在方铅矿集合体中的分布是不均匀的，其粒径一般较方铅矿小一个数量级。通过对矿石的浸蚀鉴定，它们主要以细-微粒粒间银的形式分布在方铅矿颗粒之间（图版 5-4、5-6）；少数沿方铅矿、贫铁闪锌矿、石英等的粒间、裂隙或者解理产出，如含银黝铜矿分布在方铅矿和闪锌矿晶粒之间（图版 5-2）、硫锑铜银矿在方铅矿裂隙中呈裂隙银（图版 5-1）。银矿物可划分为 5 个成分系列：Ag-Cu-（Fe，Zn）-（Sb，As）-S 系列，Cu-Sb-Ag-S 系列，Sb-Ag-S 系列，Ag-S 系列和自然元素系列，这 5 个系列对应的特征矿物分别为含银黝铜矿、硫锑铜银矿、深红银矿、辉银矿、自然银，它们的化学成分依次变简单，含量依次减少（除自然银），形成依次变晚。在银矿物沉淀过程中，从早到晚，沉淀在其中的 Cu、Fe、Zn、Sb、As 减少，银矿物的成份变简单；这与矿化阶段(I)到矿化阶段(II)，Cu、Fe、Zn 的沉淀减少是一致的。

3.2.1.2 脉石矿物

蚀变矿物主要有石英、菱铁矿-菱铁镁矿、含铁白云石、方解石、绢云母、（铬）白云母、绿泥石，还有少量钠黝帘石、阳起石；原岩残留矿物有斜长石、黑云母和角闪石等。这些脉石矿物在同一矿脉或矿石标本的不同部位，含量变化较大。在块状矿石中，脉石矿物主要为石英，有时含少量碳酸盐；在浸染状或团块状矿石中主要为石英、碳酸盐、绢云母、（铬）白云母、斜长石，有时含少量绿泥石、黑云母、角闪石等。主要脉石矿物特征如下：

石英 为矿床最主要的非金属矿物，普遍见于各类矿石中，形成于热液阶段的始终，遍及整个矿床产出。区别不同阶段石英不仅是成矿阶段划分的重要内容，而且是成矿流体包裹体研究的基础。常见的产出特征有：*(1）浅色蚀变岩中的粗-中粒石英* 无色透明，它形粒状，长轴 0.8～5mm，呈单晶体或集合体与细粒石英、绢云母、菱铁矿-菱铁镁矿、（铬）白云母一起组成蚀变岩（图版 3-4，12-1，12-2）。*(2）浅色蚀变岩中的细粒石英* 无色透明，它形粒状，长轴＜0.02mm，常与菱铁矿-菱铁镁矿、绢云母交织在一起（图版 3-6）。*(3）近 EW 向石英-黄铁矿脉中或被褐色闪锌矿细脉穿插的脉状石英* 灰白色或乳白色，它-半自形，粗-中粒。*(4）矿脉中含星点或团块状黄铁矿的石英* 灰白色，粗-中粒，它-半自形。*(5）含星点或团块状闪锌矿的石英* 白色，中粒，它-半自形，可见小晶洞构造。*(6）不含硫化物的脉状石英* 灰白色，粗-中粒，呈（网）脉状产出，脉宽 n～n×10cm，肉眼很少见硫化物，可以是矿化前、矿化期或矿化后沉淀，矿化前的为乳白

色或灰白色，矿化期和矿化后的为烟灰色、无色或灰白色。*(7）块状、稠密浸染状方铅矿-闪锌矿矿石中的石英* 呈单晶体或集合体分布在粗-细粒方铅矿-闪锌矿集合体中。单晶体石英的自形程度相对较高（图版 8-1），多数呈半自形，少数为它形或自形，长轴 0.1～5mm，部分破损成“残晶”，指示石英并非是原地结晶形成，而是结晶之后运移而来的；集合体中的石英多数为它形，少数为半自形。可被方铅矿溶蚀（图版 9-1）。*(8）方解石-石英阶段的石英* 无色透明，半－自形，中-细粒，多呈细脉状、梳状、晶簇或晶洞状产出。

碳酸盐矿物 是脉状 Ag-Pb-（Zn）矿床中普遍存在的蚀变矿物，随着矿床容矿围岩的不同，所产出的碳酸盐矿物的种类也会不同，显示碳酸盐中的 CO_2 主要来源于成矿流体，而碳酸盐中的 Ca、Mg、Fe、Mn 等则很大程度来源于围岩，详细地研究 H_2O-NaCl-KCl-CO_2 等流体与围岩进行的水-岩反应是重要的科学问题。本矿床碳酸盐矿物可分为两类，一类是近矿脉浅色蚀变岩中的细微粒菱铁矿-菱铁镁矿集合体（图版 3-4，3-6），它们常与绢云母、细粒石英交织在一起；另一类是主要呈（细）脉、梳状、晶洞状产出的中-细粒半-自形含铁白云石或方解石。常见含铁白云石或方解石细脉穿插菱铁矿-菱铁镁矿集合体。*(1）菱铁矿-菱铁镁矿系列矿物* 短柱状，长轴 0.025～0.05mm,为近矿脉热液蚀变矿物，主要通过 H_2O-NaCl-KCl-CO_2 流体交代铁镁质矿物形成，包括有菱铁矿 、锰菱铁矿、镁菱铁矿和菱铁镁矿。菱铁矿的 2 个电子探针分析平均含 FeO 47.39%、MgO 9.27%、CaO 0.05%、MnO 9.27%、SiO_2 0.17%；镁菱铁矿的 2 个电子探针分析平均含 FeO 44.93%、MgO 10.65%、CaO 1.14%、MnO 0.53%；菱铁镁矿的 3 个电子探针分析平均含 FeO 34.42%、MgO 19.16%、CaO 0.55%、MnO 0.74%、SiO_2 1.23%、K_2O 0.12%、Al_2O_3 0.75%。*(2）含铁白云石* 半-自形或它形，长轴 0.5～1.5mm。呈细粒集合体交代铁镁质矿物、斜长石等；或呈中-细粒细脉穿插于节理、小裂隙、蚀变岩(图版 10-7)或硫化物矿脉石中；或呈菱面体晶形的晶洞状集合体产出（图版 7-4）。其 2 个探针分析结果为(表 3-3)：平均含 MgO 16.57%、CaO 27.85%、FeO 7.21%、Al_2O_3 0.12%、MnO 0.55%、K_2O 0.03%。Fe^{2+}进入白云石晶格只有在缺氧的还原条件下才能进行，含铁白云石的出现是还原环境的标识。*(3）方解石* 呈梳状（细）脉、晶簇、晶洞产出，半-自形，粗-细粒，如沙沟矿区节理或小裂隙中的方解石细脉，月亮沟、四道沟的方解石脉等。

表 3-3 碳酸盐类矿物的电子探针分析结果(wt%)

Table 3-3 Eectron probe microanalysis of carbonate minerals, Shagou deposit

矿物	样 号	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	FeO	NiO	总和	化学分子式
菱铁矿	57-2①	-	2.58	-	0.22	-	0.08	0.16	11.11	46.15	-	60.31	$(Fe_{0.74}Mn_{0.18}Mg_{0.07})_{0.99}CO_3$

菱铁矿	SG-2-1-3	0.06	1.34	0.14	0.12	0.04	0.02	-	7.43	48.62	0.01	57.78	$(Fe_{0.84}Mg_{0.04}Mn_{0.12})CO_3$
镁菱铁矿	SG-1-3	-	10.96	0.03	0.13	0.01	1.79	-	0.50	43.40	0.17	56.99	$(Fe_{0.67}Mg_{0.3}Ca_{0.03})CO_3$
镁菱铁矿	185-3	-	10.34	-	-	-	0.48	-	0.56	46.45	-	57.83	$(Fe_{0.72}Mg_{0.28})CO_3$
菱铁镁矿	86-2	0.59	7.77	-	0.19	-	0.24	-	7.37	45.32	-	61.47	$(Fe_{0.67}Mg_{0.20}Mn_{0.11}Na_{0.02})CO_3$
菱铁镁矿	1-2	0.09	21.12	0.57	0.75	0.02	0.11	0.02	0.34	34.12	0.02	57.16	$(Fe_{0.48}Mg_{0.52})CO_3$
菱铁镁矿	SG-1-L-2	0.03	19.60	0.92	1.42	0.10	0.19	0.03	0.49	34.45	0.06	57.29	$(Fe_{0.5}Mg_{0.5})CO_3$
菱铁镁矿	105-2①	0.02	16.75	0.75	1.52	0.23	1.35	-	1.38	34.69	-	57.08	$(Fe_{0.54}Mg_{0.46})CO_3$
含铁白云石	43-2	0.05	16.79	0.06	-	0.01	27.58	0.01	0.46	6.86	-	51.80	$(Mg_{0.42}Ca_{0.49}Fe_{0.09})CO_3$
含铁白云石	43-3	-	16.34	0.17	0.14	0.04	28.12	-	0.63	7.55	0.06	53.05	$(Mg_{0.4}Ca_{0.5}Fe_{0.1})CO_3$
含铁白云石	216-1	0.28	14.51	-	0.13	-	33.11	-	1.68	9.28	-	59.01	$(Ca_{0.53}Mg_{0.32}Fe_{0.12}Mn_{0.02})CO_3$
方解石	SG-1-L-3	0.00	0.01	0.03	0.04	0.03	55.79	-	0.04	0.17	0.02	56.13	$CaCO_3$

数据由作者采样，中国地质科学院矿产资源研究所探针室测试

碳酸盐 FeO 含量变化范围为 0.17～48.62%，矿物相应地为方解石→含铁白云石→菱铁矿；CaO 含量变化范围为 0.02～55.79%，矿物相应地为菱铁矿→含铁白云石→方解石；MgO 含量变化范围为 0.01～21.12%，矿物相应地为方解石→含铁白云石→菱铁镁矿。在该矿床较早的细-微粒碳酸盐矿物中，FeO 和 MgO 含量较高，CaO 含量较低；在较晚的粗-细粒碳酸盐矿物（主要为方解石）中，CaO 含量较高，FeO 和 MgO 含量较低。

云母 *（1）绢云母* 主要呈微细粒鳞片状集合体（图版 3-4），长轴 4～40 μm，部分绢云母是由斜长石蚀变而成，分布于石英与碳酸盐矿物（图版 3-6）之间。绢云母的 10 个电子探针分析平均含 Al_2O_3 34.22%、SiO_2 48.51%、MgO 0.63%、Cr_2O_3 0.28%、FeO 0.79%、Na_2O 0.04%、K_2O 10.45%（表 3-4）。*（2）（铬）白云母* 为常见的蚀变矿物，含量一般小于 10%，手表本为鲜绿色（图版 3-7），在单偏光镜下颜色为无色-黄绿色，干涉色为黄绿-蓝，长轴多为 0.2～0.6mm，常见切面为长条形，该切面平行消光，沿叶理面或呈浸染状分布于蚀变岩中。铬云母在矿区是一种特色蚀变矿物，与俄罗斯乌拉尔 Berezovsky、北美西部大陆边缘 Highland valley 斑岩铜矿和我国胶东金矿中的铬云母十分相似，含铬约 1-2%（毛景文等，2006）。铬云母在蚀变岩中出现在碳酸盐矿物和石英之间，部分呈明显的定向排列，偶尔还可以见到钠长石和奥长石。铬云母以其鲜绿色的特征（图版 11-1,11-2），可作为识别矿化蚀变破碎带的标志。*（3）黑云母* 集合体大小为数百个 μm（图版 12-1），绿泥石化常见（图版 12-7,12-8），为原岩残留矿物。

表 3-4 白云母/绢云母的电子探针分析结果(wt%)

Table 3-4 Eectron probe microanalysis of muscovite / sericite, Shagou deposit

样 号	产地	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	TiO2	Cr_2O_3	MnO	FeO	NiO	总和
1-3	CM102-S16W-NYM-570 中段	0.04	0.50	36.45	47.51	9.53	0.03	-	-	0.43	-	94.49
SG-2-1-1		0.05	0.41	34.85	47.67	10.55	-	-	-	0.31	-	93.84
SG-2-1-2		0.08	0.52	34.58	47.93	10.01	0.02	-	-	0.32	-	93.46
SG-2-2-1		0.06	0.65	34.30	48.44	10.17	0.00	-	-	0.37	0.01	94.00
SG-2-2-2		0.01	0.78	34.81	50.10	10.03	0.02	-	0.01	0.42	0.02	96.20

SG-1-1		0.07	0.94	33.89	48.45	10.85	0.02	-	-	0.79	0.04	95.05
SG-1-2		0.09	1.05	33.98	48.00	10.87	0.02	0.01	0.03	0.92	-	94.97
109-1①	CM102-S16W-NYM-534 中段	-	-	33.47	50.00	10.47	0.01	1.15	0.08	0.77	-	95.95
109-2①		-	1.09	31.80	48.85	11.22	-	1.28	-	2.54	-	96.78
105-3①	CM103-S16	-	0.34	34.06	48.20	10.85	-	0.07	0.16	1.03	-	94.70

1-3	$(K_{0.80}Na_{0.01})_{0.81}(Al_{1.97}Fe_{0.02}Mg_{0.05})_{2.14}[(Si_{3.13}Al_{0.87})_{4.0}O_{10}](OH)_2$
SG-2-1-1	$(K_{0.90}Na_{0.01})_{0.91}(Al_{1.93}Fe_{0.02}Mg_{0.04})_{1.99}[(Si_{3.19}Al_{0.81})_{4.0}O_{10}](OH)_2$
SG-2-1-2	$(K_{0.85}Na_{0.01})_{0.86}(Al_{1.93}Fe_{0.02}Mg_{0.05})_{2.00}[(Si_{3.20}Al_{0.80})_{4.0}O_{10}](OH)_2$
SG-2-2-1	$(K_{0.86}Na_{0.01})_{0.87}(Al_{1.91}Fe_{0.02}Mg_{0.06})_{1.99}[(Si_{3.22}Al_{0.78})_{4.0}O_{10}](OH)_2$
SG-2-2-2	$K_{0.83}(Al_{1.90}Fe_{0.02}Mg_{0.08})_{2.00}[(Si_{3.25}Al_{0.75})_{4.0}O_{10}](OH)_2$
SG-1-1	$(K_{0.92}Na_{0.01})_{0.93}(Al_{1.86}Fe_{0.04}Mg_{0.10})_{2.00}[(Si_{3.21}Al_{0.79})_{4.0}O_{10}](OH)_2$
SG-1-2	$(K_{0.92}Na_{0.01})_{0.93}(Al_{1.86}Fe_{0.04}Mg_{0.09})_{1.99}[(Si_{3.21}Al_{0.79})_{4.0}O_{10}](OH)_2$
109-1①	$K_{0.88}(Al_{1.86}Fe_{0.04}Cr_{0.06})_{1.96}[(Si_{3.28}Al_{0.72})_{4.0}O_{10}](OH)_2$
109-2①	$K_{0.95}(Al_{1.71}Fe_{0.14}Mg_{0.11}Cr_{0.07})_{2.03}[(Si_{3.23}Al_{0.77})_{4.0}O_{10}](OH)_2$
105-3①	$K_{0.92}(Al_{1.88}Fe_{0.06}Mg_{0.03}Mn_{0.01})_{1.98}[(Si_{3.21}Al_{0.0.79})_{4.0}O_{10}](OH)_2$

注：按 11 个氧计算，（OH）为理想式. 数据由中国地质科学院矿产资源研究所探针室测试

其它硅酸盐矿物 *(1)斜长石* 长轴 0.6～1.2mm，钠长聚片双晶常见，多绢云母化、碳酸盐化（图版 12-6），多为为原岩残留矿物；少部分斜长石非常新鲜，没有任何蚀变，钠长聚片双晶清晰可见（图版 12-7），这种钠长石应该是热液交代形成的。*(2)绿泥石* 为沙沟矿床较重要的蚀变矿物（图版 12-7,12-8），由黑云母或角闪石蚀变而来，大小数十 μm，为细小鳞片状集合体，一般只存在于蚀变较轻的围岩中，较少存在于矿石中。*(3)钠黝帘石* 由基性斜长石蚀变而来，含量少（图版 12-5）。 *(4)玉髓* 在 S14 方铅矿-石英脉中，可见少量玉髓。

3.2.2 化学成份

在沙沟矿床中，不同种类矿石的化学成分变化较大，但主要化学成分一般为 Pb、Zn、Ag、Fe、S、Mn、Cu、Sb、SiO_2、Al_2O_3 等。本矿床主要可利用金属是 Ag、Pb、Zn、Cu。已探明矿石量 154 万吨，Ag 平均品位 767g/t，Pb 平均品位 13.24%，Zn 平均品位 4.31%（郑榕芬等，2006）；矿体品位变化系数 Ag 为 40～108%、Pb 为 52～98%、Zn 为 52～129%，有用组分分布属不均匀型。Ag 最高品位 18462g/t，共生 Pb 58.04%，伴生 Zn 0.83%。大部分金属矿物中都含有一定量的银，Ag 主要是以含银黝铜矿、硫锑铜银矿、浓红银矿、自然银产出，呈细-微粒分布在方铅矿颗粒之间。Pb 主要呈方铅矿，Zn 主要是呈贫铁闪锌矿，Cu 主要呈黄铜矿，少量 Zn 和 Cu 参与含银黝铜矿的成分内。矿石中 Ag、Pb、Zn 含量相关性分析表明，Ag 与 Pb 的线性相关性好，Pb 品位变高时 Ag 也趋向变高；Ag 与 Zn 的线性相关性差，Zn 品位变高时，Ag 不变高；而 Pb 与 Zn 的相关性最差。

矿石常量元素分析（表 3-5）可以大致反映非金属脉石矿物的平均化学成分特征。矿石中 SiO_2 含量主要与石英、斜长石、绢云母有关；Al_2O_3 含量主要与斜长石、绢云母、黑云母、绿泥石、角闪石有关；Fe_2O_2 和 FeO 含量主要与含铁碳酸盐矿物、黑云母、绿泥石、角闪石有关；K_2O 含量主要与绢云母、黑云母有关；CO_2、MnO、MgO、CaO 含量，主要与碳酸盐类矿物有关。

表 3-5　沙沟银铅锌矿床部分矿石常量元素分析结果统计表

Table 3-5 Major elements of ores, Shagou Ag-Pb-Zn ore deposit

化学成分	最高含量/%	最低含量/%	平均含量/%	化学成分	最高含量/%	最低含量/%	平均含量/%
SiO_2	68.28	43.80	54.96	Na_2O	2.94	0.05	0.95
Al_2O_3	14.45	7.89	10.64	TiO_2	1.02	0.47	0.66
Fe_2O_3 + FeO	28.45	10.42	14.31	P_2O_5	0.35	0.18	0.23
MnO	5.16	1.59	2.70	SO_3	2.31	0.11	0.79
MgO	3.78	0.33	1.45	CO_2	12.39	0.08	3.85
CaO	5.99	0.67	2.59	Cl^-	0.01	0.01	0.01
K_2O	4.66	2.59	3.35	LOSS	13.13	3.31	7.13

（据 2005 年详查报告）

表 3-6　沙沟银铅锌矿床部分矿石微量元素分析结果表

Table 3-6 Trace elements of ores, Shagou Ag-Pb-Zn ore deposit

样 号									
	元 素	Pb	Ag	Zn	Cu	As	Sb	S	MgO
	含量（%）	2.39	186(10^{-6})	0.89	0.03	0.0019	0.027	0.45	6.94
2005-1	元 素	CaO	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	MnO_2	CO_2	TFe	有机炭
	含量（%）	12.89	36.67	4.67	1.47	2.06	18.33	5.02	0.1
2005-2	元 素	Au(g/t)	Ag(10^{-6})	Pb	Cu	Zn	TFe	S	Sb
	含量（%）	0.06	495.5	14.05	0.04	2. 16	9.05	1.15	0.10
	元 素	Cr	Co	Ti	Mn	SiO_2	Al_2O_3	Cl	烧失量
	含量（%）	0.004	0.00012	＜0.001	2.09	47.08	1.96	1.26	7.76
2005-3	元 素	Pb	Ag (10^{-6})	Zn	Cu	Fe	Sb	Bi	Sn
	含量（%）	4	0.002	1. 52	0.01	4	0.007	0.0005	0.0005
	元 素	Mn	Mo	Ni	Co	B	Cr	V	Ti
	含量（%）	1	0.0001	0.0005	0.0005	0.0005	0.002	0.001	＜0.001
	元 素	Ga	Sr	Ge	In	Si	Al	Mg	Ca
	含量（%）	0.001	0.02	0.0002	0.0001	＞10	2	3.5	4
	元 素	Na	K	Zr	Au	As	-	-	-
	含量（%）	0.3	＜1	0.003	未检出	未检出	-	-	-

（据 2005 年详查报告）

3.2.3 矿石结构、构造

为典型后生热液矿床的结构和构造，常见的类型如下：

3.2.3.1 矿石结构

按矿物粒度大小有粗粒（2 mm<粒度<20mm）、中粒（0.2 mm<粒度<2mm）、细粒（0.02 mm<粒度<0.2mm）和微粒（<0.02mm）结构。部分方铅矿、闪锌矿、石英、方解石、含铁白云石为粗粒结构；大部分热液矿物为中粒结构；银矿物以细粒为主；绢云母、部分

银矿物、部分碳酸盐矿物、少数方铅矿呈微粒。

常见**结晶结构**有：*自形晶结构*　在白色石英中、方铅矿粒间、石英粒间或晶洞中，可见立方体自形黄铁矿（图版 8-3）；在方铅矿粒间、方解石-石英脉中，可见六方柱状自形石英(图版 8-1)；在方铅矿粒间，可见自形闪锌矿(图版 8-2))。*半自形晶结构*　S_{17} 中的黄铁矿、石英-闪锌矿集合体中的石英、闪锌矿、粗-中粒方铅矿、方解石-石英脉中的石英等常为半自形。*它形晶结构*　浅色蚀变岩中的中-细粒石英、细-微粒碳酸盐矿物、中-细粒方铅矿、黄铜矿、银矿物、裂隙面内的含铁白云石等常见这种结构。*全自形晶粒状结构*　由一种或多种矿物组成的矿石，其中一种金属矿物多呈较完好的晶形，其体积含量在 80%以上者，称全自形晶粒状结构（尚浚，1986）。若其体积含量在 30～80%者，这里称之为*自形晶粒状结构*。该矿床中石英的自形粒状结构常见，少数石英呈全自形晶粒状结构，石英颗粒之间为硫化物或银的硫盐矿物（图版 8-1）。*半自形晶粒状结构*　条带或脉状闪锌矿、石英-方铅矿矿石或交变石英岩的石英为这种结构。*它形粒状结构*　中-细粒块状方铅矿矿石中方铅矿常为这种结构（版图 6-7）。*填隙结构*　闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、含银黝铜矿、硫锑铜银矿、黄铁矿等一种或几种矿物充填在半-自形石英、黄铁矿颗粒或裂隙之间。例如，它形方铅矿 、黄铜矿充填于石英、黄铁矿颗粒之间(图版 8-4)；方铅矿-黄铜矿分布于它-半自形黄铁矿颗粒或裂隙之间（图版 8-6）。*包含结构*　S17 石英-黄铁矿脉石英中包含微粒黄铁矿、方铅矿、石盐等固体包裹体；蚀变岩中的粗-中粒石英包含菱铁矿-镁铁菱矿+绢云母、白云母或半自形黄铁矿颗粒残余；在黑云斜长片麻岩中，常见中粒石英包含细粒黑云母（图版 12-1）。

常见**交代结构**有：*镶边结构（反应边结构）*　黄铜矿交代含银黝铜矿呈镶边结构(图版 9-6)。*溶蚀交代结构*　绢云母、细-微粒碳酸盐、细粒石英+绢云母、绢云母+微细粒碳酸盐交代斜长石，钠黝帘石交代斜长石，绿泥石交代黑云母、角闪石，阳起石交代角闪石；闪锌矿溶蚀半-自形黄铁矿（图版 9-3）、石英，闪锌矿细脉充填溶蚀梳状石英，闪锌矿+方铅矿交代石英，闪锌矿+黄铜矿交代自形黄铁矿；方铅矿溶蚀黄铁矿、闪锌矿、含银黝铜矿、半-自形石英；黄铜矿溶蚀石英、闪锌矿、方铅矿；含银黝铜矿溶蚀方铅矿；石英溶蚀闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、中粒碳酸盐，或呈细脉状交代绢云母化斜长石并残留斜长石的聚片双晶结构；中粒半自形碳酸盐熔蚀中粒自形石英，细-微粒碳酸盐、白云母溶蚀粗粒石英；白铅矿交代方铅矿。*交代骸晶结构*　闪锌矿、方铅矿或石英交代半-自形黄铁矿形成骸晶结构（图版 9-4），闪锌矿、方铅矿或黄铜矿交代半-自形石英形成骸晶结构，方铅矿交代含银黝铜矿形成骸晶结构。*交代乳滴状结构*　黄铜矿呈无序排列或

定向排列的乳滴状或叶片状的交代乳滴状结构分布于闪锌矿中（图版 9-5）。*交代残余结构*　闪锌矿交代石英呈交代残余结构，方铅矿交代石英、闪锌矿呈交代残余结构(图版 9-1，9－2)。*交代网状、格状、筛状、交叉结构*　石英呈网状、格状交代闪锌矿；方铅矿呈格状交代石英，呈交叉结构交代闪锌矿，呈网状、筛状交代闪锌矿或含银黝铜矿(图版 9-7)。

常见**压力结构**有：方铅矿三角孔弯曲线状排列呈*揉皱结构*；部分白云母呈*定向变晶结构*；部分石英、黄铁矿呈*斑状压碎结构*；部分黄铁矿、闪锌矿和石英等脆性矿物呈碎裂结构(图版 8-7)，形成大小不一而且棱角清楚的碎块，后来硫化物、石英或碳酸盐细脉充填于其裂隙中。

常见**颗粒内部结构**有：少数半自形-自形石英（图版 11-5，11-6）、浅黄色闪锌矿、斜长石在光学显微镜下可见*环带结构*；斜长石常见*钠长双晶*，也可见*卡钠复合双晶*(图版 12-7)；方铅矿经稀盐酸浸蚀后，*解理结构*清晰可见(图版 6-8)；部分石英、黄铁矿可见*裂理结构*。

3.2.3.2 矿石构造

矿石构造主要有块状构造、（细脉）浸染状构造、（网）脉状构造、条带状构造、角砾状构造、团块状构造、透镜状构造、泥状构造和梳状、晶簇、晶洞构造。

块状构造　主要分布在 S16、S14、S8 和 S2 中(图版 2-3,2-5)，常出现在断裂交汇处相对厚大的囊状矿体之中。常为方铅矿、闪锌矿、石英和少量含银黝铜矿、黄铜矿、黄铁矿、硫锑铜银矿、碳酸盐矿物等组成的致密块状矿石(图版 2-1)。

（细脉）浸染状构造　主要分布在 S16、S2 中。方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、含银黝铜矿、硫锑铜银矿等呈（细脉）浸染状分布在石英、菱铁矿-含铁白云石-菱镁矿、绢云母、白云母等脉石矿物组成的蚀变岩中。

脉状构造（≥ 10 cm）　S17 等近 EW 向黄铁矿-石英或辉绿岩脉、有时沿着辉绿岩脉充填的乳白色石英脉、近 SN 向闪锌矿-石英或方铅矿-闪锌矿-石英脉、NE-NNE 向方铅矿-闪锌矿-石英脉或方解石脉充填于太华岩群中。

细脉状构造（<10 cm）　黄铁矿-石英细脉穿插于围岩节理或小裂隙、蚀变岩、石英脉中；（S 型）雁列闪锌矿-石英细脉穿插于断裂内的蚀变岩中，浅黄色闪锌矿细脉穿插于褐色闪锌矿细脉中；石英细脉穿插于围岩、蚀变岩(图版 10-7)、闪锌矿脉、方铅矿-闪锌矿-石英脉或烟灰色石英中，石英雁列细脉穿插于断裂内的蚀变岩中，白色石英细脉穿插于闪锌矿脉中(图版 10-4)，玉髓细脉穿插于方铅矿-闪锌矿-石英矿脉中；（S 型）含铁

白云石细脉穿插于围岩节理或裂隙、硅化辉绿岩脉、蚀变岩、白色石英透镜体的裂隙、白色石英脉、方铅矿-闪锌矿-石英脉或烟灰色石英之中。在光学显微镜下观察到的细脉状构造：闪锌矿细脉穿插石英、黄铁矿晶体，闪锌矿-石英细脉、闪锌矿-黄铜矿细脉穿插黄铁矿晶体；黄铁矿细脉穿插闪锌矿；方铅矿细脉穿插石英晶体或含银黝铜矿，方铅矿-石英细脉穿插石英晶体；黄铜矿细脉穿插黄铁矿、闪锌矿(图版 7-5)、方铅矿、硫锑铜银矿、石英或分布于石英和方铅矿的颗粒之间；石英细脉穿插斜长石、粗-中粒石英、黄铁矿、闪锌矿、绢云母集合体、碳酸盐-绢云母-石英集合体(图版 7-7)、或中粒含铁白云石；含铁白云石细脉穿插（绢云母化）斜长石、粗粒它形石英晶体、菱铁矿-菱铁镁矿-含铁白云石-（绢云母）集合体、石英-绢云母集合体、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿或黄铜矿，微-细粒含铁白云石细脉穿插；方解石-（石英）细脉穿插绢云母化斜长石、粗-中粒石英、菱铁矿-菱铁镁矿-含铁白云石-（绢云母）集合体。

交错脉状和网脉状构造 硫化物呈细交错脉状或网脉状构造穿插于浅色蚀变岩中。

条带状构造 S16 最常见。闪锌矿、方铅矿-闪锌矿-石英呈条带状穿插于断裂内蚀变岩中，闪锌矿条带和白色石英条带组成条带状构造。在光学显微镜下观察到的条带状构造如下：闪锌矿条带、蚀变岩条带组成条带状构造，闪锌矿条带、石英条带组成条带状构造，浅黄色闪锌矿条带、半-自形石英条带、含铁白云石条带组成条带状构造，闪锌矿条带、菱铁矿-菱铁镁矿条带、（绢云母）-石英条带组成条带状构造，菱铁矿-菱铁镁矿条带、白云母条带组成条带状构造。

角砾状构造 石英胶结含绿云母蚀变岩角砾；中-细粒方铅矿胶结白色石英角砾。

团块状构造 中粒方铅矿-石英脉中含闪锌矿团块(图版 7-2)。

透镜状构造 褐色闪锌矿透镜体分布于蚀变岩中；蚀变岩透镜体分布于方铅矿-闪锌矿-石英脉中。

晶簇、晶洞、梳状构造 矿化阶段石英呈梳状细脉或晶洞生长，内部可充填有方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、含银黝铜矿等（版图 7-8），生长壁为菱铁矿-菱铁镁矿+绢云母集合体（版图 7-7）；在月亮沟 S8 中，方解石呈晶簇、晶洞(图版 7-4)、梳状生长，生长壁为碳酸盐-绢云母蚀变岩；在沙沟 S16，可见含铁白云石晶洞；在四道沟，方解石-石英呈梳状细脉生长（图版 11-6）。

3.2.4 矿石类型和品级

根据氧化程度的不同，可分为氧化矿石（矿石的氧化率大于 30%）、混合矿石（矿石的氧化率在 10～30%之间）、原生矿石（矿石的氧化率小于 10%）。沙沟矿床矿石氧化

程度很低，以原生银铅锌矿为主；氧化矿石和混合矿石极少，分布在地表和浅部。工业类型可分为银铅（锌）矿石、铅银（锌）矿石、银铅锌矿石。银为主矿种；铅为共生矿；锌主要为共生矿，局部为伴生矿，如 S14 矿脉以 Ag、Pb 为主,锌为伴生矿。综合矿物成分、矿石品位、矿石构造，将沙沟矿床矿石分为：

块状方铅矿型银铅（锌）富矿石（I） 为含 Zn 的 Ag-Pb 矿石，是沙沟矿床最常见的富矿石，为富矿体的主要矿石类型，经手选即可进行冶炼，主要分布在 S2、S6、S14、S16、S16E、S8 等矿脉的富矿体中。有用组分以 Ag、Pb 为主，Zn 含量相对较低，一般含 Pb>45%，平均为 60%，Ag 平均为 2250g/t，Zn 平均为 7%。银主要以独立矿物的形式赋存于方铅矿集合体中，少部分以类质同象等形式存在于硫化物中。有时含有乳白色石英或浅色蚀变岩条带或团块。致密块状构造，主要为中-细粒晶粒结构，少量为粗或微粒结构。主要矿物为方铅矿，其体积百分含量>80%（图版 4-3），其次为石英、闪锌矿、含银黝铜矿等银矿物、黄铁矿、黄铜矿、含铁白云石等。脉石矿物主要为石英，部分含少量含铁白云石。方铅矿为它-半自形，长轴 0.07～3mm，多数为中-细粒。闪锌矿多数呈短柱状，中粒，体积含量与石英相当，趋向于和石英聚集在一起，普遍被方铅矿交代。含银黝铜矿呈它形粒状，形状有椭圆形、圆形、次圆形等，长轴 0.03～0.15mm，多数分布于方铅矿颗粒之间。石英多数呈半自形，少数呈自形或它形，粒径一般与方铅矿相当，呈单晶体或集合体不均匀地分布在方铅矿集合体中。

稠密浸染状银铅锌矿石（II） 大部分为富矿石，少部分为特富银或中等品位矿石，是该矿床最重要的矿石类型之一。多为深灰色，稠密浸染状构造，填隙结构常见。。金属矿物主要有方铅矿、闪锌矿和银矿物，含少量黄铜矿、黄铁矿；脉石矿物主要为石英，含少量碳酸盐、云母。方铅矿体积含量大于 40%，它形，中-细粒；石英呈烟灰色，半-自形，中-细粒。值得注意的是，在几乎不含石英的块状方铅矿矿石中，银品位一般为 1000～3000g/t；但在该矿石类型中含有一定量烟灰色石英的稠密浸染状矿石中，银品位可达 10000g/t。

（细脉）浸染状蚀变岩型银铅锌矿石（III） 是该矿床数量较多的矿石，分布于富矿体两侧或呈团块状分布于富矿体中，部分为中等品位矿石，部分为贫矿石，Pb+Zn 平均品位 8～12%，Ag 350g/t。矿石本身为蚀变岩，多为灰白-浅灰色，相对于前一种矿石，碳酸盐、云母含量变高，石英含量相对变少，方铅矿多呈稀疏浸染状或细脉浸染状分布于石英-碳酸盐-云母蚀变岩中。可细分为三种：(1) *细网脉或浸染状含银含锌铅矿石* 为中等品位矿石，主要分布在 S2、S6、S14 及 S7 南段块状矿体的上下盘，个别地段该类

型矿石独立产出，铅品位比锌品位高。细网脉或浸染状构造，中-细粒结构。矿石矿物主要为方铅矿、闪锌矿和银矿物，脉石矿物主要为石英、碳酸盐矿物、云母等。(2) *细网脉或浸染状含银含铅锌矿石* 主要分布在 S8、S16E、S16W 等矿脉中。细网脉或浸染状构造，中-细粒结构，主要有用矿物组成为闪锌矿、方铅矿和银矿物，闪锌矿含量较方铅矿高。(3) *细网脉或浸染状蚀变岩型含铅含锌银矿石* 多为中等品位矿石，已查明的此类矿石主要分布于 S16E 矿体，网脉状、浸染状构造，中-细粒结构。矿石矿物主要为方铅矿、闪锌矿和银矿物，方铅矿、闪锌矿含量相对较低，但银品位较高，脉石矿物为石英、碳酸盐、绢云母、(铬)白云母、及绿泥石等。

条带或团块状锌或银铅（锌）矿石（IV） 中等品位银铅锌矿石，少数为富矿石，常见于 S16、S16E。条带状矿石部分为 Zn 矿石，矿石矿物主要为闪锌矿，脉石矿物为石英、碳酸盐、云母等；部分为银铅（锌）矿石，矿石矿物为方铅矿、闪锌矿、银矿物，脉石矿物为石英、碳酸盐、云母等。

泥状银锌铅矿（V） 主要分布于 S7 矿脉，部分富锌，部分富铅。方铅矿和闪锌矿被构造活动破碎成泥状，570m 标高以上的矿石发生部分氧化。

3.3 围岩蚀变

3.3.1 围岩主要类型

容矿围岩主要为新太古界太华群黑云斜长片麻岩（图版 3-1）、斜长角闪岩、角闪岩，其次为侵入其中的基性岩脉、闪长岩等。不同种类的围岩，其蚀变的特点有所不同。**斜长角闪岩** 斜长石 40～60%，角闪石 40～60%。可见斜长石钠黝帘石化，角闪石阳起石化。**黑云母斜长片麻岩** 部分呈条带状构造。石英呈它形粒状，长轴 0.1～3mm，含量 30～50%；斜长石呈它形粒状，长轴 0.8～5mm，含量 25～30%，多数见钠长双晶，少数见环带，不同程度地绢云母化；黑云母长轴 0.2～3.6mm，含量 20～35%。常见黑云母、斜长石被石英交代，斜长石绢云母化、碳酸盐化，斜长石和石英晶体被方解石细脉穿插。**基性岩脉** 普遍遭受强烈蚀变，主要蚀变矿物为石英，其次为绢云母、碳酸盐。与其它原岩相比，近矿脉基性岩脉表现为更加强烈的石英化，多蚀变为细微粒交变石英岩。**闪长岩** 部分矿脉局部地段的围岩为侵入太华群的闪长岩，闪长岩的年龄有待研究。

3.3.2 围岩蚀变类型

破碎带两侧发育典型的中低温热液蚀变，近矿围岩蚀变的类型主要有硅化、碳酸盐化、绢云母化和黄铁矿化及其叠加类型，如石英+碳酸盐化、石英+碳酸盐+绢云母+(铬)

白云母+（黄铁矿）化、碳酸盐+绢云母化。另外，在蚀变较轻时可见斜长石钠黝帘石化、黑云母绿泥石化、角闪石阳起石化及其叠加类型绿泥石+钠黝帘石化、绢云母+阳起石化。地表及浅部有高岭土化。围岩蚀变带受 NNE-NE 向破碎带控制。银、铅、锌矿化与硅化、碳酸盐化、绢云母化紧密相关。

硅化 是本矿床分布最广泛的蚀变，发育于整个热液成矿阶段。主要分布在构造破碎带内,表现为成矿热液交代或充填各类构造岩形成石英化岩石和石英脉等。在硅化不太强烈地段,石英呈粒状或细脉状集合体穿插交代原岩。可以分为矿化前硅化、矿化期硅化和矿化后硅化。矿化前强烈石英化在构造带内常形成规模较大的充填状乳白或灰白色石英脉；受矿化期构造作用,矿化前石英常破碎成大小不一的碎块，在裂隙中充填有硫化物。矿化期石英为石英细脉或网脉，呈烟灰色或灰白色，油脂光泽；与多种金属硫化物和硫盐矿物共生，与矿化关系密切。矿化后石英呈无色或灰白色，以半-自形晶为主，呈（细）脉状穿插于碳酸盐矿物-绢云母蚀变岩、硫化物脉或围岩中，与粗-细粒碳酸盐共生，呈规模不等的碳酸盐-石英细脉或网脉产出，可见玉髓细脉；或呈断续的石英细脉穿插蚀变岩或块状矿石，其中偶含细粒黄铁矿或闪锌矿。常见矿化前粒度大、晶形较好的石英颗粒，在矿化阶段热液作用下，边缘细粒化，或者被矿化阶段的细粒石英、碳酸盐或绢云母穿插，硫化物细脉沿着细粒石英脉分布。

碳酸盐化 为该矿床主要的蚀变类型之一，蚀变岩中铁镁质矿物普遍发育碳酸盐化，碳酸盐蚀变矿物有菱铁矿-菱镁矿系列矿物、方解石、含铁白云石，以细-微粒菱铁矿-菱镁矿系列矿物集合体为主。靠近矿脉，碳酸盐化强烈，岩石蚀变为石英+细微粒菱铁矿-菱镁矿系列矿物+绢云母蚀变岩；远离矿脉，碳酸盐化变弱，且主要表现为碳酸盐细脉。

绢云母化 是近脉的主要热液蚀变类型之一，分布范围广、强度大，发育于热液演化的始终。矿化阶段硫化物-石英脉和方解脉两侧斜长石均普遍绢云母化。富 K^+、H^+的流体交代原岩中斜长石，形成绢云母和细粒石英，并且伴有自形黄铁矿，而原岩中的中粗粒石英则残留在蚀变岩中。当蚀变较轻时，绢云母呈细鳞片状沿着斜长石解理、裂隙、双晶纹交代斜长石；当蚀变较强时，表现为绢英岩化，原岩矿物除石英外，几乎全部为绢云母所取代。在斜长石的绢云母化过程中，在溶液中 K^+、H^+的浓度在降低，而 Si 的浓度在升高。细-微粒碳酸盐矿物集合体进一步改造绢云母+细粒石英集合体，形成细-微粒碳酸盐矿物+绢云母+细粒石英集合体。

（铬）白云母化 在该矿床中，白云母化在部分蚀变岩中发育，可与细-微粒碳酸盐化、绢云母化、石英化组合形式碳酸盐-绢云母-石英-白云母蚀变岩。总体来讲，当围岩

是片麻岩时，出现绢云母或白云母；当围岩是镁铁质-超镁铁质岩时，较发育绢云母或铬云母。

绿泥石化 绿泥石是铁、镁、铝的含水铝硅酸盐矿物，绿泥石化是中-低温热液的一种重要和常见的交代蚀变。在该矿床中，在较弱蚀变条件下原岩中黑云母、角闪石广泛发生绿泥石化，主要表现为绿泥石沿解理、裂隙部分或完全交代原岩矿物而形成矿物假象，局部可见绿泥石呈细脉状出现，可穿插白云石脉。与细微粒菱铁矿-菱镁矿-菱锰矿系列矿物、绢云母相比，绿泥石分布一般离矿脉较远，靠近矿脉绿泥石被绢云母取代。在黑云母绿泥石化过程中，溶液中的 H^+浓度在降低，而 K^+、Mg^{2+}、Fe^{2+}、Si 的浓度在升高。

黄铁矿化 是区内在矿化过程中强度较弱但分布较广范的蚀变类型，常以星点状集合体分布于近矿脉蚀变岩中。

3.3.3 围岩蚀变分带

郭时然（1995）、隋颖慧等（2000）分别将蒿坪沟矿床和铁炉坪矿床围岩蚀变划分为绿泥石-绢云母化带、绢英岩化带和硅化带三个蚀变带。沙沟矿床蚀变带宽度为数米至十几米，与矿化规模及强度成正比。各类围岩蚀变在空间上以矿脉/矿化体为中心对称发育，呈较明显的分带特点，从正常围岩向矿脉，特征蚀变依次为绿泥石化→绢云母化→碳酸盐化→硅化。根据蚀变矿物组合可大致划分为绢云母-碳酸盐-绿泥石化弱蚀变带、石英-碳酸盐-绢云母-少量硫化物/硫盐弱矿化强蚀变带和交变石英岩带，颜色总体上从浅到深。

绢云母（或钠黝帘石）-绿泥石-碳酸盐化弱蚀变带 该带多位于破碎带以外，宽度较大，和围岩呈渐变过渡关系，多数保留原岩矿物晶形、结构构造等特征，为热液蚀变较轻的部分。与正常围岩相比，明显特征为颜色变浅；斜长石绢云母化或钠黝帘石化，绢云母沿斜长石的解理裂隙交代斜长石，随蚀变的增强完全取代之并保留斜长石晶形假象；角闪石、黑云母绿泥石化，多已被绿泥石完全取代，但保留原矿物的晶形、解理等特征，局部残留孤岛状角闪石、黑云母；碳酸盐多呈细脉状穿插石英、斜长石等。在绿泥石化的角闪石、黑云母中可见不透明矿物沿其解理、裂隙分布，可能为角闪石、黑云母中铁质析出所形成。另外，可见角闪石阳起石化。

石英-碳酸盐-绢云母-少量硫化物/硫盐弱矿化强蚀变带 灰白色，该带发育于破碎带内及两侧，宽数十厘米至数米，与矿化关系密切，局部构成矿体，是重要的近矿脉蚀变标志。蚀变强烈，原岩颜色、成分、结构构造特征消失，原岩中的斜长石、角闪石和黑云母等已完全为石英、碳酸盐、绢云母、（铬）白云母等蚀变矿物取代。石英无色透明，

油脂光泽，明显增大；碳酸盐含量明显增加，呈浸染状或细脉状。可见中粗粒石英包含细粒绢云母。金属矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿等，呈星点状集合体分布于蚀变岩中。该蚀变岩矿物含量变化较大，可大致分为两种，一种以中粒石英为主，菱铁矿-菱铁镁矿-含铁白云石、云母次之；另一种以菱铁矿-菱铁镁矿-含铁白云石、云母为主，石英次之。

交变石英岩带 部分矿体两侧发育。石英为它-半自形，粗-中粒，含量>90%，少量碳酸盐、绢云母呈细脉或星点状分布于石英集合体中。

3.4 成矿阶段与矿物生成序列

3.4.1 热液期

沙沟矿床成矿流体演化具有多阶段性。石英脉、石英-黄铁矿脉、硫化物-硫盐-石英矿脉、含铁白云石脉、和方解石-石英脉等都是热液活动的产物，从它们的相互穿插关系、矿石的结构和构造、矿物共生组合等，本文将矿床的热液成矿过程分为矿化前的石英-黄铁矿-（方铅矿）-（黄铜矿）阶段（I）、主矿化阶段（II_1 和 II_2）和其后的方解石或含铁白云石-石英阶段（III）：

3.4.1.1 石英-黄铁矿阶段（I）

形成乳白色石英脉、S17 等石英-黄铁矿脉或黄铁矿-石英脉、NE-NEE 向矿脉中的石英-黄铁矿团块或被褐色闪锌矿细脉穿插的白色石英脉等，其中，近 EW 向 S17 被 NE-NEE 向矿脉穿插的。该阶段早期以沉淀石英为主，晚期沉淀的黄铁矿明显增多。共生矿物简单，沉淀的氧化物为石英，硫化物主要为黄铁矿，有时可见少量方铅矿、黄铜矿。矿物组合有石英+黄铁矿（图版 10-1）、石英+黄铁矿+（方铅矿）+（黄铜矿）。这一阶段沉淀出大量的黄铁矿，是沙沟矿区黄铁矿的主要形成阶段。石英主要为中粒，它-半自形，部分石英中含微粒黄铁矿、方铅矿或氯化钠固体包体。石英和黄铁矿裂隙或颗粒之间充填有其后沉淀的方铅矿或黄铜矿。对 S17 黄铁矿-石英集合体的 Pb、Au 含量进行化学分析，结果为 Pb 0.14%，Au<0.1 g/t。沉淀的特征元素为 Si、O、Fe、S。相应的蚀变类型以硅化、绢云母化、黄铁矿化为主。

3.4.1.2 闪锌矿-粗粒方铅矿-石英-银矿物主矿化阶段（II_1）

这一阶段的闪锌矿指条带状、脉状、以及白色石英或蚀变岩中的星点状或团块状闪锌矿，在 S16 矿脉中最发育。矿物主要有闪锌矿、方铅矿和石英，还有少量黄铁矿、黄铜矿。闪锌矿呈褐色，粗-中粒，半-自形，其中常见乳滴状、叶片状微粒黄铜矿。石英呈白色，粗-中粒，它-半自形。闪锌矿和石英中有时可见很小的晶洞，主要是沿裂隙原

地结晶而成的。黄铁矿呈细条带状产出，有时与闪锌矿呈平行条带产出，它-半自形，中-细粒。沉淀的特征元素主要有 Si、O、Zn、S，还有少量的 Fe、Cu。铜可以有两种形式沉淀出来，一种是以类质同像的形式随着闪锌矿的结晶而沉淀出来，另一种是在该阶段后期以黄铜矿细脉的形式沉淀出来。相应的蚀变类型以硅化、绢云母化、铬云母化为主。划分依据：(1）褐色闪锌矿角砾被中粒方铅矿集合体包裹（图版 7-2)。(2）褐色闪锌矿脉和中-细粒方铅矿脉截然分开(图版 2-4)。(3）褐色闪锌矿细脉穿插于不含硫化物的乳白色石英脉中(图版 10-3)，不含硫化物的白色石英细脉穿插于褐色闪锌矿中(图版 10-4)；说明在条带状或脉状褐色闪锌矿沉淀前后，均存在一个明显缺少硫化物沉淀的时期。(4）褐色闪锌矿呈星点状或团块状分布与白色石英中。(5）在条带状或（细）脉状褐色闪锌矿中很少见银矿物，说明条带状或（细）脉状褐色闪锌矿和银矿物沉淀于不同时期。

3.4.1.3 方铅矿-石英-闪锌矿-银矿物主矿化阶段（II_2）

为最主要的矿化阶段，大量金属硫化物、硫盐矿物相继沉淀。金属矿物主要有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、银的硫盐矿物（含银黝铜矿、硫锑铜银矿、浓红银矿)、辉银矿、黝铜矿、自然银等；非金属矿物有石英和含铁白云石。矿物组合有方铅矿+石英+含银黝铜矿、石英＋方铅矿＋闪锌矿＋黄铜矿、石英+黄铁矿+方铅矿+黄铜矿、石英+黄铁矿+方铅矿+闪锌矿+含银黝铜矿、方铅矿+石英+含银黝铜矿+深红银矿+硫锑铜银矿、方铅矿+石英+黄铜矿+含银黝铜矿+黝铜矿+自然银。方铅矿可分为粗粒、中-细粒、微粒三个世代。粗粒方铅矿主要与闪锌矿、含银黝铜矿共生；而在中-细（微）粒方铅矿可以与闪锌矿、黄铜矿、含银黝铜矿、硫锑铜银矿、浓红银矿等共生。闪锌矿多呈短柱状，中粒，常以单颗粒或集合体分散在方铅矿颗粒之间，多被方铅矿交代。黄铜矿多呈它形，常以细脉状分布于方铅矿中，或者以填细结构与方铅矿、闪锌矿等一起充填于石英颗粒之间。银的硫盐矿物多呈它形粒状，主要分布于方铅矿颗粒之间，一般与方铅矿并无交代现象，有时可见方铅矿交代含银黝铜矿。石英呈中-细粒，半-自形，常被硫化物溶蚀，该阶段晚期常见晶洞、晶簇、梳状构造，且晶洞中常充填有方铅矿、闪锌矿、含银黝铜矿、黄铜矿等。沉淀的特征元素主要有 Si、O、Pb、S、Cu、Ag、Sb，还有少量 Fe、Zn、Mg。该阶段很少有黄铁矿沉淀，闪锌矿、含银黝铜矿中的铁含量较低。Sb 在这一阶段集中沉淀，是这一阶段的显著特征之一；在银矿物中，Sb 含量较 As 和 Bi 的含量高一个数量级，而且该矿床中砷化物含量也非常少。蚀变类型以硅化、碳酸盐化、绢云母化为主。

3.4.1.4 方解石-石英阶段（III）

以出现大量方解石（细）脉和少量含铁白云石细脉、石英细脉、不规则黄铁矿细脉为特征，标志热液演化进入尾声。矿物组合有方解石+石英（图版 11-6）、铁白云石+石英，以（细）脉、梳状、晶洞、晶簇构造产出。方解石为半-自形，粗-中粒；含铁白云石为它形-半自形，粗-中粒；石英为无色，半-自形柱状，中-细粒。在晚阶段的矿物组合中，当石英与方解石共存时，在一般情况下石英晶体从脉壁向脉心生长，方解石位于脉心；在极少数情况下方解石晶体从脉壁向脉心生长，石英位于脉心。沉淀的特征元素主要有 C、O、Si、Fe、Mg、Ca，大量 Ca^{2+}的沉淀是该阶段的显著特征。蚀变矿物为碳酸盐、绢云母及少量分布于蚀变岩中的细脉状石英。

3.4.2 表生期

以强烈的硬锰矿化、褐铁矿化（图版 10-8）为特征。在地表或浅部，银、铅等有益组分通过表生淋滤作用，从被氧化的金属硫化物等中分解出来，并在裂隙或溶蚀孔洞中形成褐铁矿等氧化物、硬锰矿等氢氧化物、铅矾等硫酸盐矿物、白铅矿等碳酸盐矿物、自然银之类的次生矿物。

3.4.3 矿物生成序列

表 3-7 沙沟 Ag-Pb-Zn 矿床金属矿物、主要脉石矿物和蚀变矿物共生序列

Table 3-7 Assemblages of metal minerals and altered minerals, Shagou Ag-Pb-Zn deposit

矿物	热液期				表生期
	阶段 I	阶段 II_1	阶段 II_2	阶段 III	
黄铁矿					
闪锌矿					
方铅矿					
黄铜矿					
自然银					
辉银矿					
黝铜矿					
含银黝铜矿					
硫锑铜银矿					
浓红银矿					
石英					
绢云母					
菱铁矿					
镁菱铁矿					
菱铁镁矿					
含铁白云石					
方解石					
绿泥石					

钠/奥长石	
自然银	
褐铁矿	
白铅矿	
硬锰矿	
铅矾	

第四章 成矿流体包裹体和稳定同位素组成

成矿流体是控制热液矿床形成的重要因素，因而备受矿床研究者关注（Samson Iain M. et al, 1997; 卢焕章, 1998；J.J. Wilkinson, 2001）。成矿流体的研究对象主要包括两个方面，即成矿流体包裹体和成矿流体蚀变产物。成矿流体包裹体是成矿溶液或者硅酸盐熔融体在矿物结晶生长过程中，被捕获在矿物晶体缺陷、空穴、晶格空位、位错及微裂隙之中，而且至今尚在主矿物中完好封存并与主矿物有着相界限的独立封闭体系。它能够提供原始成矿溶液或者硅酸盐熔融体的直接样品，能够反映矿物形成时的物理化学条件。成矿流体包裹体研究是揭开成矿流体以及成矿作用机理的钥匙（Roedder，1984），对于解决矿床成因、成矿的物理化学条件、成矿流体来源和演化等方面具有十分重要的意义。

4.1 流体包裹体岩相描述和显微测温

4.1.1 分析方法

为了探讨成矿流体的来源、成分及演化规律，笔者在不同标高对沙沟矿床 S16、S16W、S14、S8、S2 等主要矿脉按成矿阶段进行了系统取样，将石英、闪锌矿和方解石样品制成 100μ厚双面抛光的包裹体片进行流体包裹体岩相学和显微测温研究。实验所选用的热台为英国 Linkam THMSG600 型冷热台，其温度控制范围为-196~600℃，精度为 0.1℃，升降温速率为 0.1~130℃/分。所用的显微镜为德国 ZEISS 公司生产的 Axioskop 40 和 Axiolab 型号的显微镜，其放大倍数为 100~800 倍，包裹体测定时选用的放大倍数为 500 倍。在-56.6、0.0 和 374.1℃，系统用人造包裹体进行了校正（Sterner and Bodnar,1984）。本次实验低温测定精度控制在±0.2℃，高温测定控制在±1℃。对两相（LV）包裹体，盐度由 NaCl-H_2O 体系的冰点温度，利用经验公式（Hall et al.，1988）或（Bodnar and Vytik，1994）来计算，密度利用经验公式（刘斌，1987）来求得；对三相（LVH）包裹体，盐度由子晶溶解温度来计算（Sterner et al.，1988），密度由经验公式（刘斌等，1987）来计算；对 CO_2-H_2O 型包裹体，盐度通过 CO_2 笼形化合物熔化温度与盐度关系表

（Collins，1979）来确定，密度用相图（Shepherd et al.，1985）或经验公式（刘斌等，1987）求得。Hedenquist and Henley（1985）指出由子晶溶解温度估计的盐度经常会由于如 CO_2 等挥发性溶质的存在而出现一些偏差；但通过拉曼光谱分析，在本次研究中溶解在三相（LVH）流体包裹体中的 CO_2 含量较低，对 NaCl 盐度估计影响较小。

4.1.2 岩相描述及显微测温

对沙沟矿区近 EW 向石英-黄铁矿脉等中的石英（Q_1）、矿脉中与 I 阶段黄铁矿共生的石英或乳白色石英（Q_2）、与粗粒方铅矿共生的石英（Q_3）、与中-细粒方铅矿-闪锌矿共生的石英（Q_4）以及方解石-石英阶段的方解石和石英（Q_5）中的流体包裹体进行了岩相描述和显微测温。这里将原生包裹体理解为孤立于其它包裹体面或沿生长环带出现的包裹体，次生包裹体理解为切穿晶体边界沿面状分布的包裹体，假次生包裹体理解为沿面状分布于单晶体之内的包裹体（Bodnar et al.，1985）。有时，由于不存在岩相标识或标识太模棱两可，包裹体相对晶体的形成不能被有把握地确定，这时包裹体的成因被描述为“不确定的（indeterminable）”（Goldstein，2003）。

表 4-1 流体包裹体不同阶段的主矿物特征

Table 4-1 Host minerals of fluid inclusions in different stages

阶段	I		II_1	II_2	III	
矿物	石英 Q_1	石英 Q_2	石英 Q_3	石英 Q_4	石英 Q_5	方解石
特征	分布于石英-黄铁矿脉（近 EW 向）、节理或小裂隙中；白色或无色，粗-中粒，它-半自形；黄铁矿呈它－半自形，其颗粒或裂理之间充填有方铅矿和石英	分布于矿脉两壁，乳白色；多数为中粒，少数为粗粒或细粒，它-半自形；可见小晶洞构造；集合体之间可见少量细微粒碳酸盐矿物集合体；有些与黄铁矿共生，黄铁矿为中-细粒，半-自形，其裂隙中可含方铅矿或黄铜矿；石英中可包含有细-微粒黄铁矿	分布于矿脉中，与粗-中粒硫化物密切共生；灰白色或无色，中-细粒，半自形-自形或它形	分布于矿脉中，呈单颗粒或多颗粒集合体分布在块状硫化物集合体中或形成填隙结构，与中细粒硫化物密切共生；中-细粒，半自形-自形或它形，常被硫化物溶蚀	分布于近矿脉浅色蚀变岩，与方解石共生；中细粒，自形-半自形，无色，（梳状）细脉状、晶簇构造	见于月亮沟、四道沟等 NE-NNE 向构造中，粗粒，自形-半自形，常见晶簇、梳状构造
原生	三相（LVH） 两相（LV）	两相（LV）	两相（LV）	两相（LV）	两相（LV）	两相（LV）
样号	81-1、81-2、38-1、38-2、B1、B2、B3	1	2、29、73、236、242	142、173、227、235、		

对 24 件代表性样品的详细测试和研究表明，本区与矿化关系密切的石英、闪锌矿和方解石中含有较丰富的流体包裹体，原生、假次生和次生包裹体都较常见。根据流体包

裹体成分及室温下存在相态，可将沙沟银铅锌矿床石英和方解石中包裹体类型划分成五种：**（1）气液包裹体(V-L 型)** 占包裹体总数的 90%以上，为该矿床石英、方解石中的主要流体包裹体类型，出现在石英 $Q_{1\text{-}5}$ 或方解石中；由盐水溶液（液相）和水（气相）组成，气相百分数为 5～50%，一般为 5～15%；孤立产出或沿生长环带分布，或沿矿物愈合微裂隙定向分布；次圆形、不规则、长条形、菱形、负晶形等，在不同阶段主矿物中大小差别较大，一般为 3～14 μ。**（2）含子晶多相包裹体(S 型)** 大量出现在石英 Q_1 中，呈孤立状分布，理解为原生包裹体；大小一般为 6～12 μ；子矿物为立方体状石盐，有时室温(25℃)下不出现子晶，只有在冷冻-升温过程中才出现立方体子晶。**（3）富气或纯气体包裹体（V 型）** 出现在石英 Q_1（图版 13-1）、Q_2 中，其气液比>50%，气体部分呈黑色；在 Q_1 中孤立状分布，在 Q_2 中孤立或沿矿物愈合微裂隙定向分布；通常为寄主矿物的负晶形或椭圆形，大小一般为 7～15 μ。**（4）纯液体包裹体(L 型)** 偶尔出现在石英 Q_1 中，室温(25℃)下未见气泡；一般沿裂隙分布，穿插 V 或 V-L 型包裹体；负晶形、次圆形或不规则型，4～10 μ。**（5）CO_2 包裹体(C 型)** 室温下呈三相，由 CO_2（气相）+CO_2（液相）+水溶液（液相）组成，CO_2 相的体积分数小于 10%；该类包裹体较为少见，出现在石英 Q_2 或偶尔出现在 Q_4 中，在 Q_4 中分布不均匀且常出现在较透明的石英细脉内；孤立状产出，理解为原生包裹体；形态为次圆状、负晶形或不规则，大小为 4～10 μ。有时在室温下不出现液态 CO_2，只有在冷冻条件下才能将其与气液包裹体区分开来。

各热液阶段有不同的流体包裹体组合，根据包裹体产出特征及相互间穿插关系，可将流体包裹体分成早(I)、中(II)和晚(III)三个阶段(表 4-1)。早阶段包裹体组合为 V-L 和 S 型或 V-L、V 和 C 型，组合较复杂，在不同类型石英中包裹体组合不同；中阶段为 V-L 和 C 型，但常见的为 V-L 型；晚阶段为 V-L 型，组合最简单。由早到晚，流体包裹体类型变简单。

4.1.2.1 石英-黄铁矿-（方铅矿）-（黄铜矿）阶段（I）

三相（LVH）包裹体(I_1) 出现在石英 Q_1 中，数量较多，孤立自由分布，不形成线状痕迹，理解为原生包裹体。子矿物为 NaCl，形态为立方体、负晶形或不规则，大小为 4～12 μ，气相百分数为 5～15%，气、液相均为无色。在室温下，这类包裹体有时只可见气、液两相，只有在冷冻-升温过程中才会忽然结晶出一立方体晶体（图版 14-2，14-3）。在显微测温过程中，该类包裹体一般气泡先消失，子矿物后消失，说明溶液为过饱和。5 件样品 96 个包裹体的均一温度（LVH→LH）为 108～246℃，平均为 157℃；子矿物消

失温度为 160～290℃，平均 225℃；由子矿物溶解温度计算盐度（Sterner et al.，1988）为 30.06～37.40%，平均为 33.25%；应用刘斌等（1987）的经验公式：$\rho=a+bt_h+ct^2_h$(a、b、c 均为无量纲参数)，求得流体密度为 1.07～1.23g/cm^3，平均为 1.17g/cm^3。利用拉曼光谱分析，在三相（LVH）包裹体中未能检测到 CO_2。

两相（LV）包裹体（I_2） 出现在石英 Q_1 中，常与包裹体（I_1）共生，两者岩相特征相似，也认为是原生包裹体，形态多数较规则，少数为不规则，大小一般为 4～14μ，气、液相均为无色，气液比为 5～15%。在同一群包裹体中，均一温度和冰点温度是一致的。均一温度为 140～250℃，一般为 160～200℃。利用拉曼光谱分析，未能检测到 CO_2。在 2 件白色石英样品中，26 个气液两相包裹体的气相百分数为 5～10%，形态为多数为不规则、次圆状，少数为规则，大小为 4～14μ；均一温度为 147～198℃，平均 176℃，均一为液相；冰点温度为-7.5～-4.0℃，平均为-5.4℃；利用 Hall 等（1988）的盐度计算公式：$w=0.00+1.78t_m+0.0442t^2_m+0.000557t^3_m$，可得对应盐度为 6.45～11.10%，平均为 8.36%；应用刘斌等（1987）的经验公式求得流体密度为 0.93～0.99g/cm^3，平均为 0.95g/cm^3。

两相（LV）包裹体（I_3） 大量出现在石英 Q_1 中，气相百分数为 5～15%，形成穿切晶体边界的线状痕迹，明显为次生包裹体，非常不规则，而且较前者大，6～30μ。在 2 件样品中，17 个包裹体的均一温度为 174～252℃，平均 200℃，均一为液相；冰点温度为-8.1～-7.3℃，平均为-7.8℃；相应盐度为 10.86～11.81%，平均为 11.50%；流体密度为 0.89～0.98g/cm^3，平均为 0.95g/cm^3。

两相（LV）包裹体（I_4） 出现在石英 Q_1 中，形成许多穿切其它包裹体组合的线状痕迹，认为是次生包裹体，大小<4μ，未进行显微测温。

两相（LV）包裹体(I_5) 出现在石英 Q_2 中，包裹体呈孤立自由、沿生长环带或主矿物内部的微裂隙分布，理解为原生或假次生包裹体。形态多为不规则或次圆状，少数为规则；包裹体很小，在中-细粒石英中可测包裹体大小为 2～4μ，在粗粒石英中可测包裹体大小为 2～8μ；气液比一般为 10～30%，气、液相均为无色。1 件乳白色石英中 5 个原生包裹体均一温度为 285～360℃，平均为 325℃。由于包裹体很小，冰点温度难以测定。

纯气体包裹体(I_5) 形态一般为规则或负晶形，大小 4～10μ，数量较少，在石英 Q_1 中孤立出现（图版 13-1），认为是原生包裹体；在石英 Q_2 中沿穿切主矿物边界的裂隙

分布，为次生包裹体。

表 4-2 流体包裹体岩相描述和显微测温数据总表

表 4-2 Summary table of the fluid inclusions of this study, including fluid inclusion petrography and microthermometry

阶段	主矿物	室温下相数	类型[1]	形状	大小(μm)	气液比(%)	均一温度 T[2]（℃）		盐度(wt.NaCl%)		密度（g/cm³）		样品件数	测量数（个）
							范围	均值	范围	均值	范围	均值		
I	石英 Q_1	3-LVH	原生	立方体、负晶形或不规则	4~12	5~15	108~246	157	30.06~37.40	33.25	1.07~1.23	1.17	5	96
	石英 Q_1	2-LV	原生	多数较规则	4~14	5~10	147~198	176	6.45~11.10	8.36	0.93~0.99	0.95	2	26
	石英 Q_1	2-LV	次生	非常不规则	6~30	5~15	174~252	200	10.86~11.18	11.50	0.89~0.98	0.95	2	17
	石英 Q_1	1-V	原生	规则	4~10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	石英 Q_2	2-LV	原生	不规则、次圆	2~8	10~30	285~360	325	-	-	-	-	1	5
	石英 Q_2	1-V	次生	规则	4~8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
主矿化（II_1）	闪锌矿	2-LV	原生	次圆、不规则	2~10	10~20	227~357	273	-	-	-	-	1	15
	石英	2-LV	原生	不规则、次圆	2~8	10~30	185~286	240	4.65~6.74	5.56	0.80~0.92	0.85	1	16
	石英 Q_3	2-LV	原生	不规则、次圆	4~10	15~20	195~287	225	6.45~11.10	8.73	0.81~0.94	0.90	3	30
	石英 Q_3	3-LV	原生	不规则	6~8	-	227~235	231	5.14~7.87	6.50	-	-	1	2
总体							185~375	241	4.65~11.10	7.77	0.80~0.94	0.89	5	61
主矿化（II_2）	石英 Q_4	2-LV	原生	不规则、次圆	2~6	5~10	158~288	198	1.91~5.71	3.92	0.78~0.93	0.87	1	18
	石英 Q_4	2-LV	原生	不规则、次圆	2~6	5~10	158~287	207	2.07~5.26	2.88	0.78~0.93	0.88	1	15
	石英 Q_4	2-LV	原生	不规则、次圆	3~8	5~10	145~235	178	3.71~10.86	7.02	0.91~0.96	0.94	3	34
	石英	2-LV	原生	不规则	2~12	5~15	186~246	214	7.73~9.34	8.43	0.88~0.94	0.91	1	15
总体							145~288	194	1.91~10.86	8.43	0.88~0.94	0.91	6	82
III	石英 Q_5	2-LV	原生	不规则、柱状	3~6	5~10	141~208	166	1.74~4.03	2.39	0.89~0.95	0.93	1	14
	方解石	2-LV	原生	不规则、管状或菱形	4~8	5~10	129~206	164	1.40~3.87	2.56	0.87~0.95	0.93	3	44
总体							129~208	165	1.40~4.03	2.50	0.87~0.95	0.93	4	58

[1] 根据 Roedder,1984，[2] 所有流体包裹体都均一到液相；数据由作者测定

4.1.2.2 闪锌矿-粗中粒方铅矿-石英-黄铁矿-黄铜矿-少量银矿物主矿化阶段（II_1）

在矿化阶段石英中流体包裹体种类十分简单，一般为气液包裹体,气液比一致，体积较小，偶尔可见少数含 CO_2 三相包裹体，未见含子矿物多相包裹体。尽管爆裂法气相质谱分析（表 4-1）显示该类包裹体的气相成分中含 CO_2，但由于气相体积非常小，以至于在常温下和低温下偶尔才能观察到 CO_2 相，但少量 CO_2 不足以改变水溶液包裹体的基本特性。

在 1 件细条带状闪锌矿样品中，闪锌矿内 15 个原生气液两相包裹体（图版 13-6，13-8）的气相百分数为 10～20%，形态为次圆或不规则状，大小为 2～10μ；均一温度为 227～357℃，平均 273℃，均一为液相。与条带状闪锌矿共生的石英中有时还可见少量纯气体包裹体。

在与黄铁矿条带和闪锌矿条带共生的 1 件灰白色半-自形中粒石英样品中，16 个原生气液两相包裹体的气相百分数为 10～30%，形态主要为次圆状、不规则，少数为规则，大小为 2～8μ；均一温度为 185～286℃，平均 240℃，均一为液相；冰点温度为-4.2～-2.8℃，平均为-3.4℃；对应盐度为 4.65～6.74%，平均为 5.56%；流体密度为 0.80～0.92g/cm^3，平均为 0.85g/cm^3。

在 3 件 S14 号脉块状粗粒方铅矿内半-自形中粒石英样品中，30 个原生气液两相包裹体气相百分数为 15～20%，形态为为不规则、次圆状或规则，大小为 4～10μ；均一温度为 195～287℃，平均 225℃；冰点温度为-6.7-4.0℃，平均为-5.6℃，均一为液相；对应盐度为 6.45～10.11%，平均为 8.73% 流体密度为 0.81～0.94g/cm^3，平均为 0.90g/cm^3。在半自形中粒石英中，2 个孤立分布的含 CO_2 三相包裹体位于石英晶体中央，远离次生包裹体面，形态为不规则，包裹体大小为 6～8μ，而主矿物大小仅为 80μ，理解为原生包裹体；均一温度为 227～235℃，部分均一温度为 29～30.8℃，CO_2 笼形化合物熔化温度为 5.7～7.3℃，通过 CO_2 笼形化合物熔化温度与盐度关系表（Collins，1979）确定盐度为 5.14～7.87%，根据部分均一温度与 CO_2 相密度关系图解（Shepherd et al.，1985）求得 CO_2 相密度约为 0.6g/cm^3。

在以上 5 件样品中，61 个原生气液两相包裹体的均一温度为 185～357℃，变化很大，平均 241℃，均一为液相；冰点温度为-6.7～-2.8℃，平均为-5.0℃；盐度 4.65～10.11%，平均为 7.77%；流体密度为 0.80～0.94g/cm^3，平均为 0.89g/cm^3。

4.1.2.3 中细粒方铅矿-石英-闪锌矿-黄铜矿-银矿物-含铁白云石主矿化阶段（II_2）

主矿化阶段（II_2）伴随硫化物一起沉淀有许多石英 Q_4，其中流体包裹体一般为气液

两相包裹体，偶尔可见极少数含 CO_2 三相包裹体，未见纯气体包裹体和含子矿物多相包裹体。原生气液包裹体呈孤立自由或沿生长环带分布，形态多数为不规则、次圆状，大小为 2～7μm，气、液相均为无色，气液比 5～15%。

在 1 件 S8 号脉方铅矿-闪锌矿-石英组合石英中，18 个原生气液两相包裹体的气相百分数为 5～10%，形态为多数为不规则、次圆状，少数为规则，大小为 2～6μ；均一温度为 158～288℃，平均 198℃，均一为液相；冰点温度为-3.5～-1.1℃，平均为-2.2℃；对应盐度为 1.91～5.71%，平均为 3.92%；流体密度为 0.78～0.93g/cm^3，平均为 0.87g/cm^3。

在 1 件 S14 号脉的方铅矿-石英组合中，15 个原生气液两相包裹体的气相百分数为 5～10%，形态为多数为不规则、次圆状，少数为规则，大小为 2～6μ；均一温度为 158～287℃，平均 207℃，均一为液相；冰点温度为-3.2～-1.2℃，平均为-1.7℃；对应盐度为 2.07～5.26%，平均为 2.88%；流体密度为 0.78～0.93g/cm^3，平均为 0.88g/cm^3。

在 3 件形成填隙结构的半-自形石英中，34 个原生气液两相包裹体的气相百分数为 5～10%，形态为为不规则、次圆状或规则，大小为 3～8μ；均一温度为 145～235℃，平均 178℃，均一为液相；冰点温度为-7.3～-2.2℃，平均为-4.4℃；对应盐度为 3.71～10.86%，平均为 7.02%；求得流体密度为 0.91～0.96g/cm^3，平均为 0.94g/cm^3。

在 1 件 S16W 号脉灰白色它-半自形石英内的透明半-自形石英细脉中，15 个原生气液两相包裹体的气相百分数为 5～15%，形态为多数为不规则，少数为长方形或三角形，大小为 2～12μ；均一温度为 186～246℃，平均 214℃，均一为液相；冰点温度为-6.1～-4.9℃，平均为-5.4℃；对应盐度为 7.73～9.34%，平均为 8.43%；流体密度为 0.88～0.94g/cm^3，平均为 0.91g/cm^3。

在以上 6 件石英样品中，82 个原生气液包裹体的均一温度为 145～288℃，变化较大，平均为 194℃，均一为液相；冰点温度为-7.3～-1.1℃，平均为-4.0℃；盐度为 1.91～10.86%，平均为 4.33%；流体密度为 0.78～0.96g/cm^3，平均为 0.92g/cm^3。

4.1.2.4 方解石-石英阶段（III）

热液脉共生序列晚阶段的矿物有方解石和石英。与 I 和 II 阶段石英相比，III 阶段石英自形程度高，而且非常清澈。该阶段方解石、石英中流体包裹体含量均较少，所有包裹体均为气液两相(V-L 型)，且由 H_2O-NaCl-KCl 流体组成。半-自形石英中包裹体较小，为 2～6μ。原生包裹体稀疏分布于主矿物中，形态呈不规则状、管状或菱形等，大小为 4～8μ，气液比 5～10%。

在 1 件石英中，58 个原生气液包裹体的均一温度变化范围为 141～208℃，平均为

166℃，均一为液相；冰点温度为-2.4～-1.0℃，平均为-1.4℃；盐度ω（NaCleq）为 1.74～4.03%，平均 2.39%；流体密度为 0.89～0.95g/cm^3，平均为 0.93g/cm^3。

在 3 件方解石中，44 个原生气液包裹体（图板 14-7，14-8）的均一温度变化范围为 129～206℃，平均为 164℃，均一为液相；冰点温度为-2.3～-0.8℃，平均为-1.5℃；盐度ω（NaCleq）为 1.40～3.87%，平均 2.56%；流体密度为 0.87～0.95g/cm^3，平均为 0.93g/cm^3。

以上 4 件样品中，58 个原生气液包裹体的均一温度变化范围为 129～208℃，平均为 165℃，均一为液相；冰点温度为-2.4～-0.8℃，平均为-1.5℃；盐度ω（NaCleq）为 1.40～4.03%，平均 2.52%；流体密度为 0.87～0.95g/cm^3，平均为 0.93g/cm^3。

4.2 流体包裹体成分

3 件石英包裹体气相和液相成分色谱分析样品分别采自沙沟矿床阶段（I）石英-黄铁矿脉、阶段（II_2）石英-闪锌矿脉和蒿坪沟花岗斑岩体内石英-黄铁矿细脉，由中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室完成。样品制备过程（朱和平等，2003）为：将纯度大于 99%的石英样品放入烧杯中，加入 HCl，在 80～100℃电热板保温 1h，过夜倒掉酸，用去离子水清洗样品数次，超声震荡 5min，再用去离子水反复漂洗，在 80℃烘箱内烘干样品。流体包裹体的气相成分分析采用加热爆裂法提取气体，其测试程序为（朱和平等，2003）：

表 4-3 沙沟、铁炉坪、蒿坪沟矿床流体包裹体成分

Table 4-3 Components of fluid inclusions in the Tieluping, Haopinggou, Shagou ore deposits

样品号	样品名称（成矿阶段）	液相成分 W(B)/×10^{-6}							Σ阳离子	Σ阴离子	$\frac{Na^+}{K^+}$	$\frac{Cl^-}{SO_4^{2-}}$
		F^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}				
SG-B1	黄铁矿石英脉	0.77	1.80	3.81	1.67	1.01	-	-	2.68	6.38	1.66	0.47
SG-B3	闪锌矿石英脉	1.19	16.70	1.41	10.0	1.42	-	-	11.42	19.30	7.04	11.84
HPG-B0	石英脉	0.40	10.90	0.75	5.91	0.60	-	0.21	6.72	12.05	9.85	14.53
TS-7	石英(Ⅰ)	0.38	15.53	26.13	9.25	25.00	0.31	0.06	34.62	42.06	0.37	0.59
TS-8	石英(Ⅰ)	0.17	21.39	26.77	10.83	22.50	0.17	0.58	34.08	48.33	0.48	0.80
TS-15	石英(Ⅰ)	0.50	17.71	12.63	10.08	10.08	0.50	1.08	21.74	30.84	1.00	1.40
TS-17	石英(Ⅱ)	0.55	27.60	35.35	15.50	36.25	0.17	0.08	52.00	63.50	0.43	0.78
TS-13	石英(Ⅲ)	0.94	27.26	6.82	6.88	28.25	0.06	0.43	35.62	35.02	0.24	4.00
TS-10	方解石	0.55	5.28	3.64	2.50	10.75	未测	未测	未测	9.47	0.23	1.45
TS-14	方解石	0.35	6.09	2.85	7.00	4.59	未测	未测	未测	9.29	1.53	2.14

样品号	矿床	气相成分 W(B)/mol%								$\frac{H_2O}{CO_2}$	$\frac{CO_2}{CH_4}$	资料来源
		H_2O	CO_2	CH_4	C_2H_6	N_2	CO	H_2S	H_2			
SG-B1	沙沟	95.56	3.63	0.45	0.33	-	-	0.03	-	26.32	8.07	本文
SG-B3		94.97	4.54	0.35	0.09	-	-	0.01	-	20.92	12.97	
HPG-B0	蒿坪沟	95.16	4.42	0.29	0.13	-	-	0.001	-	21.53	15.24	
TS-7	铁炉坪	124.47	9.44	0.03	-	0.00	0.12	-	-	13.19	315	隋颖慧等，2000
TS-8		109.12	7.77	0.014	-	0.00	0.04	-	-	14.04	555	

TS-15		11.05	7.93	0.013	-	0.00	0.06	-	-	1.39	610
TS-17		164.61	10.65	0.073	-	0.00	0.11	-	-	15.46	146
TS-13		84.28	4.65	0.023	-	0.00	0.05	-	-	18.12	202
TS-10	方解石	38.32	4.24	0.02	-	0.03	0.05	-	-	9.04	212
TS-14	方解石	69.72	4.74	0.01	-	0.03	0.03	-	-	14.71	474

注：本文数据由作者采样，委托中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室朱和平测定

将清洗干净的 500mg 样品放入石英管内，逐渐升温到 100℃，排气，待分析管内真空度 <6×10^{-6} Pa 时，将<100℃的次生包裹体和样品吸附气体去除。以 1℃/S 的速度升温到 500℃，记录压力计的读数，用液氮冷冻 5min，再用干冰冷冻 5min，记录压力计的读数（用来计算水的含量）。分析仪器为日本真空技术株式会社生产的 RG202 四板质谱仪，工作条件：SEM 电压力-1KV；电离方式 E1；离子能是 50ev；分析误差<5%。流体包裹体的液相成分分析程序为，将清洗干净的 1g 样品放入石英管中，500℃爆裂 15min，冷却后加 5ml 水，超声震荡 10min，分析仪器为日本岛津公司（SHIMADZU）的 HIC-6A 型离子色谱仪。淋洗液：2.5mM 邻苯二甲酸，2.4mM 三（羟）甲基氨基甲烷；流速：阴离子为 1.2ml/min，阳离子为 1.0ml/min。

流体包裹体成分分析结果(表 4-4)表明,沙沟矿床成矿流体气相成分以 H_2O(94.972～95.56 mol%）和 CO_2（3.631～4.536 mol%）为主，少量 CH_4，微量 C_2H_6、H_2S、Ar。液相成分中阳离子主要为 Na^+、K^+，而 Ca^{2+}、Mg^{2+}含量很低。阴离子以 Cl^-、SO_4^{2-}为主，含 F^-少。与铁炉坪矿床一样，沙沟矿床成矿流体气相成分中也均存在一定量的 CO_2，这与碳酸盐化普遍发育于成矿流体演化的始终相一致。总之，矿化阶段流体为中-低温低盐度含 CO_2 的 H_2O-NaCl-KCl 体系。

表 4-4 沙沟、铁炉坪、蒿坪沟矿床氢氧碳同位素组成（‰）

Table 4-5 Components of hydrogen-oxygen-carbon isotopes in the Tieluping, Haopinggou, Shagou ore deposits

矿区	样品编号	阶段	测试矿物	δD	$\delta^{13}C_{cal}$	$\delta^{13}C_{CO2}$	$\delta^{18}O_{H2O}$	$\delta^{18}O$	T(^{0}K)	资料来源
沙沟	SG-B1	I	石英	-88	-	-	7.8	13.9	598	本文
	SG-B2-1	II_1	石英	-82	-	-	1.0	14.3	451	
	SG-103-B1	III	方解石	-	-2.5	-	1.7	13.5	436	
蒿坪沟	BT-11	II	石英	-80.2	-	-	0.7	9.1	537	陈旺等，1996
	BT-12	II	石英	-84	-	-	1.8	9.5	552	
	BT-15	II	石英	-87.5	-	-	2.5	10.0	558	
	BT-16	II	石英	-88.8	-	-	3.9	10.8	573	
	9036	III	方解石	-	-1.7	-	1.3	13.14	436	
	蒿 K1	II	石英	-75.0	-	-	-0.3	9.35	510	王志光等，1997
	蒿 K2	II	石英	-70.7	-	-	-0.1	9.55	510	
	蒿 K3	II	石英	-59.8	-	-	1.8	11.41	510	
	蒿 K4	II	石英	-69.2	-	-	1.2	10.18	524	
	蒿 K5	II	石英	-77.1	-	-	3.4	13.09	510	
	蒿 K6	II	石英	-75.3	-	-	4.2	13.93	510	
铁炉坪	TS-8	I	石英	-89	-	0.3	9.5	15.60	598	隋颖慧等，2000
	TS-8	I	石英	-96	-	4.0	9.4	15.50	598	

	TS-15	I	石英	-84	-	0.5	8.1	14.20	598	
	TS-20	I	石英	-90	-	3.0	9.0	13.72	598	
	TS-13	III	石英	-73	-	0.1	-2.7	10.10	457	
	TS-11	III	方解石	-60	-	-2.0	-1.6	10.50	431	
	TS-16	III	方解石	-70	-	-1.4	-0.8	11.38	431	
	BT-3	III	石英	-70	-	-	-0.1	11.50	476	
	BT-5	III	石英	-68	-	-	-1.8	9.80	476	
	BT-10	III	石英	-60	-	-	-2.7	8.90	476	
	9301	III	方解石	-	-0.9	-	-2.8	8.94	436	陈旺等，1996
	9302	III	方解石	-	-0.6	-	-3.1	8.69	436	
	9303	III	方解石	-	-0.8	-	-3.1	8.63	436	
	9304	III	方解石	-	-1.7	-	0.9	12.72	436	
	9307	III	方解石		-1.2	-	-0.4	11.35	436	
花山花岗岩	FH044	花岗岩	石英	-68.7	-	-	6.6	7.9	873	
	FH052	花岗岩	石英	-64.7	-	-	8.5	9.8	873	范宏瑞等，1994b
太华岩群	FH672	混合岩	石英	-24.5	-	-	6.8	9.9	723	
	FH661	伟晶岩	石英	-27.6	-	-	5.8	9.9	673	

注：本文数据由作者采样，委托中国地质科学院矿产资源研究所万德芳、罗续荣测定.石英和水体系氧同位素分馏系数据 Clayton et al.(1972），方解石和水体系氧同位素分馏系数据 O' Neil et al.(1969)

4.3 氢氧碳同位素组成

本文石英的氧同位素组成采用 BrF_5 法在 Finningan MAT_251EM 质谱仪上测试，测试误差为±0.2‰；测定石英流体包裹体水氢同位素组成的样品经清洗、去吸附水和次生包裹体后，再采用加热爆破法从样品中提取原生流体包裹体中的 H_2O，H_2O 与 Zn 在 400 ℃条件下反应 30min 制取 H，在 Finningan MAT_251 质谱仪上测定 H_2 和 δD 值，测试误差为±3‰。氢氧同位素组成测定结果列于表 4-4 中。

5 件 I 阶段石英的 $\delta^{18}O$ 为 13.9～15.60‰，与石英平衡的流体 $\delta^{18}O_{H2O}$ 为 7.8～9.5‰，平均为 8.76‰；δD 为-96～-84‰，平均为-89.4‰。II 阶段石英的 $\delta^{18}O$ 为 9.1～14.3‰，与石英平衡的流体 $\delta^{18}O_{H2O}$ 为-0.3～4.2‰，平均为 1.8‰，明显低于 I 阶段流体；δD 为-88.8～-59.8‰，平均为-77.2‰，高于早期流体。III 阶段流体的 $\delta^{18}O_{H2O}$ 为-2.7～-0.1‰，平均为-1.6‰；δD 为-73～-60‰，平均为-66.8‰。

沙沟、铁炉坪、蒿坪沟矿床成矿流体 CO_2/CH_4 和 CO_2/CO 都很高（表 4-2），CH_4 和 CO 含量相对较低，对于整个体系及体系中 CO_2 碳同位素组成影响很小，$\delta^{13}C_{CO2}$ 可代表整个流体系统的碳同位素组成。沙沟矿床 1 件 III 阶段方解石 $\delta^{13}C_{PDB}$ 为-2.5‰；蒿坪沟矿床 1 件 III 阶段方解石的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 为-1.7‰；铁炉坪矿床 5 件 III 阶段方解石的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 为-0.6～-1.7‰，平均为 1.0‰。

4.4 硫化物硫同位素组成

本文硫同位素组成的测定流程为：以氧化铜和五氧化二钒作为混合氧化剂，在高

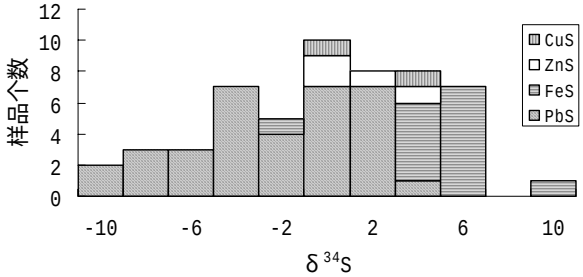

图 4-4 沙沟、铁炉坪、蒿坪沟矿床硫同位素直方图

温、真空条件下，与测试矿物反应制取 SO_2。所用仪器为 MAT 251 EM,以 V-CDT 为标准，测试精度为 0.2‰。分析结果（表 4-3）表明，测试的 3 件 FeS_2 的 $\delta^{34}S$ 变化范围为 4.4～6.3‰，平均为 5.4‰；2 件 ZnS 的 $\delta^{34}S$ 变化范围为 3.0～4.7‰，平均为 3.9‰；3 件 PbS 的 $\delta^{34}S$ 变化范围为 2.0～2.9‰，平均为 2.5‰。加上前人测试的 10 件样品，沙沟矿床 18 件硫化物矿物的 $\delta^{34}S$（表 4-3）为-9.3～6.3‰，平均 0.73‰；4 件黄铁矿、4 件闪锌矿和 9 件方铅矿 $\delta^{34}S$ 的平均值分别为 5.6‰、1.88‰和-1.6‰。硫同位素变化较大，但并不一定表明成矿溶液的硫具有多源性，因为在有些情况下，由于不同世代的矿物在不同条件下依次沉淀，岩浆（热液）成因的矿床可以具有一个宽的 $\delta^{34}S$ 范围（Gunter faure and Teresa M. Mensing，2005）。

沙沟、铁炉坪、蒿坪沟矿床 53 件硫化物的 $\delta^{34}S$ 为-9.4～9.8‰，变化范围较大，平均为-0.15‰。33 件方铅矿的 $\delta^{34}S$ 为-9.4～2.9‰，平均-2.5‰；2 件黄铜矿的 $\delta^{34}S$ 为-0.5～3.2‰，平均 1.35‰；4 件闪锌矿的 $\delta^{34}S$ 为-1～4.7‰，平均 1.9‰；12 件黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 变化范围为 3.4～9.8‰，平均 5.6‰。

表 4-5 沙沟、铁炉坪、蒿坪沟矿床硫化物硫同位素

Table 4-5 Components of sulfur isotopes in the Tieluping, Haopinggou, Shagou ore deposits

矿床	样品	矿物	$\delta^{34}S$/‰	资料来源	矿床	样品	矿物	$\delta^{34}S$/‰	资料来源
沙沟	SG-1	黄铁矿	4.4	本文	蒿坪沟	蒿 K4	黄铁矿	4.8	王志光等，1997
	SG-2	黄铁矿	6.3			蒿 K5	黄铁矿	6.5	
	SG-3-1	黄铁矿	5.6			蒿 K6	黄铁矿	6.0	
	SG-3-2	闪锌矿	4.7			AG27	方铅矿	-0.8	
	SG-4-2	闪锌矿	3.0			AG28	方铅矿	1.0	
	SG-4-1	方铅矿	2.0			AG29	方铅矿	0.1	
	SG-5	方铅矿	2.6			AG30	方铅矿	-0.1	
	SG-6	方铅矿	2.9			AG31	方铅矿	1.1	
	Y8	黄铁矿	6.1	王志光等，1997		AG32	方铅矿	-0.2	
	沙 K1	闪锌矿(浅)	0.8			S9101	方铅矿	-4.0	
	沙 K1	闪锌矿	-1.0			S9106	方铅矿	-9.4	
	-	-	-			S9108	方铅矿	-2.6	
	Y8	方铅矿	1.3			蒿 K1	方铅矿	1.3	
	-	方铅矿	-4.2			蒿 K2	方铅矿	2.2	
	qk1	方铅矿	-8.1			蒿 K4	方铅矿	-4.4	
	AG24	方铅矿	-6.5			蒿 K5	方铅矿	-0.9	
	AG26	方铅矿	-9.3			蒿 K6	方铅矿	-0.3	
铁炉坪	AG20	方铅矿	-4.8	王志光等，1997		蒿 K2	黄铜矿	3.2	
	AG21	方铅矿	-4.5			蒿 K6	黄铜矿	-0.5	
	AG22	方铅矿	-6.4		熊耳群	-	黄铁矿	3.6	范宏瑞等，1994b
	S9120	方铅矿	-1.5			SH6-3	黄铁矿	4.3	
	S9121	方铅矿	-8.8			SH-22	黄铁矿	4.6	
	AG23	方铅矿	-1.4			CH_m-DF1	黄铁矿	2.5	
	S9102	方铅矿	-5.7			CH_x-DF1	黄铁矿	5.4	
	S9118	方铅矿	-7.2		太华岩	Sb-DF1	黄铁矿	5.7	
	S9119	方铅矿	-4.9			GP-DF4-S	黄铁矿	2.9	
	TS8	硫化物	-4.5	陈衍景等，		GDF45	黄铁矿	2.9	

	TS9	方铅矿	-2.4	2003	群	FH665	黄铁矿	1.3	
	TS20	方铅矿	-4.3		花	-	黄铁矿	2.3	
蒿坪沟	S9109	黄铁矿	9.8	王志光等，1997	山	FH052	黄铁矿	2.3	
	S9113	黄铁矿	5.3		岩	DHf3	黄铁矿	1.6	
	S9104	黄铁矿	3.4		体	DHf2	黄铁矿	5.4	
	蒿 K	黄铁矿	4.4		蒿坪沟		黄铁矿	3.4	王志光等，1997
	蒿 K2	黄铁矿	4.7		斑岩		黄铁矿	4.4	

注：本文数据由作者采样，委托中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室测定

第五章 讨论与结论

5.1 讨论

5.1.1 成矿流体性质

隋颖慧等（2000）报道了与沙沟矿床处于同一矿田内的铁炉坪银铅矿床早、中、晚三阶段石英中原生流体包裹体的均一温度：1 个早阶段温度为 373℃；8 个中阶段温度范围为 210～249℃，平均 223℃；16 个晚阶段温度范围为 135～203℃，平均 165℃。但并没有报道包裹体的盐度数据。陈衍景等（2003）认为铁炉坪银铅矿中阶段流体是深部变质流体与浅部大气降水热液的混合。

5.1.1.1 石英-黄铁矿-（方铅矿）阶段

该阶段 S17 等近 EW 陡倾斜石英-黄铁矿脉或黄铁矿-石英脉，且石英和黄铁矿裂隙或颗粒之间充填有方铅矿或黄铜矿，显示该阶段近 EW 向构造处于伸展环境，这时该区最大主压应力方向应该为近 EW 向，可能是受太平洋构造体制控制。此时，NNE-NE 或 SN 向构造处于压剪性条件下，沉淀的黄铁矿相对较少。

沙沟矿床石英-黄铁矿-（方铅矿）阶段不同种类石英中的流体包裹体类型、组合、显微测温结果相差很大，显示该阶段流体较复杂。本次研究揭示在石英 Q_1 中存在两种岩相特征相似但盐度相差悬殊的不同类型包裹体（I_1 和 I_2）。其中高盐度原生包裹体 I_1 是岩浆流体组成的一个证据（Bodnar，1995）。由于该类包裹体一般气泡先消失，子矿物后消失，说明溶液为过饱和，认为是由子矿物和流体随机捕获而形成的。高盐度很可能是通过岩浆分异流体的突然减压而形成（Fournier，1999），而且在石英 Q_1 中常见少量规则的纯气体或富气包裹体，在石英 Q_2 中还可以观察到许多次生富气包裹体，这些可能是伴随突然减压形成的蒸汽端元。一种可能，I_1 和 I_2 包裹体是同时捕获的。根据 Fournier（1999）提出的模型，可能的解释是，包裹体 I_1 中出现的子矿物是由卤水经过脆-韧性转换带从深部岩浆系统零星注入以包裹体 I_2 为代表的上部热液系统而形成的。另一种可能，包裹体

I_1 和 I_2 并非同时期形成的，在这种情况下，它们代表热液系统演化的不同阶段。由于包裹体 I_1 仅仅出现在石英－黄铁矿－（方铅矿）阶段，其可以代表早期岩浆流体为主的流体系统；I_2 可能反映流体稀释的开始。

1 件乳白色石英 Q_2 中 5 个原生包裹体的均一温度为 285～360℃，平均为 325℃。而且，若以 325℃来计算铁炉坪矿床与该种石英矿物平衡的流体的氧同位素组成 $\delta^{18}O_{H2O}$，$\delta^{18}O_{H2O}$ 落入岩浆范围，氢同位素也位于岩浆流体范围下方稍许。另外，沙沟矿床 4 件黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 为 4.4～6.3‰，平均为 5.6‰，稍高于岩浆硫（4‰）（Taylor,1987）。将这种流体理解为以岩浆流体为主导是合理的，说明早阶段存在高-中温岩浆流体。

5.1.1.2 主矿化阶段（II_1 和 II_2）

该阶段大量的硫化物、石英充填于 NNE-NE 或近 SN 向构造中，而且，小晶洞、梳状构造、填隙结构发育，此时 NNE-NE 或近 SN 向构造处于拉张或张剪的应力环境下，最大主应力方向应该为 NNE-NE，与该区四川期（135～52Ma）的最大主压应力方向（万天丰，2004）一致。沙沟矿床控矿断裂所追踪的两组共轭剪切裂隙走向分别为 25°～45°和 340°～360°，控矿断裂总体延伸方向为 20°～45°，反映了最大主应力轴的方向为 NNE。沙沟矿区较发育的两组小裂隙的产状分别为 290°～316°∠60°～85°（走向 20°～46°）和 115°～127°∠70°～85°（走向 25°～37°），这两组小裂隙走向一致，倾向相反，为共轭裂隙，可以确定其最大主压应力方向约为 30°，与控矿断裂的应力场一致。另外，铁炉坪矿床控矿断裂所追踪的两组共轭剪切裂隙走向分别为 50°～60°和 340°～350°，其总体延伸方向为 25°～30°，也反映了最大主应力轴的方向为 NNE；蒿坪沟矿区破碎带走向变化一般不超过 35°，虽然追踪张裂隙所追踪的并非同期的共轭剪裂隙，但这追踪张裂隙的特征显然是由介于两者走向变化之间的 NE 向挤压作用所造成的(王志光等，1997)。因此，沙沟银铅锌矿大规模 Ag、Pb、Zn 硫化物的沉淀很有可能是发生于最大主压应力由近 EW 向（受太平洋构造体制控制）转变为 NNE 向（受四川期应力场控制）的应力转变背景下。

主矿化阶段（II）流体包裹体一般为气液两相包裹体，气相百分数为 5～15%。该阶段流体包裹体反映了主成矿阶段流体的基本特征，结合包裹体气相和液相成分色谱分析以及包裹体初融温度，主矿化阶段流体应该为中-低温低盐度含 CO_2 的 H_2O-NaCl-KCl 体系。该阶段流体氢氧同位素在 δ^{18}-δD 图上向雨水线靠近，大致位于岩浆水和雨水线中间，说明随着热液的演化，大气水参与成矿，与岩浆热液发生混合，成矿流体温度、盐度显著下降，大量硫化物、硫盐矿物相继沉淀。

主矿化阶段（II_1）近 SN 向构造中发育条带状闪锌矿和方铅矿，主要是沿张剪性裂隙原地结晶而成的，是锌的主要成矿阶段，银、铅的重要成矿阶段。该阶段 61 个原生气液两相包裹体的均一温度为 185～357℃，平均 241℃，均一为液相；冰点温度为-6.7～-2.8℃，平均为-5.0℃；盐度 4.65～10.11%，平均为 7.77%；流体密度为 0.80～0.94g/cm^3，平均为 0.89g/cm^3。为中温低盐度低密度流体。与石英中原生流体包裹体均一温度相比，条带状闪锌矿中原生包裹体的均一温度至少高 30℃。2 个原生含 CO_2 三相包裹体的均一温度为 227～235℃，盐度为 5.14～7.87%，两者均与气液包裹体的平均值一致，指示矿化阶段流体局部存在 CO_2 和盐水溶液的不混溶现象，同时也说明气液两相包裹体的均一温度能够代表成矿流体捕获温度。

主矿化阶段（II_2），为银、铅的主要成矿阶段，矿体常呈灌入式充填于 NE-NEE 构造中，硫化物-石英脉两侧的蚀变岩厚度变小，沉淀的矿物种类变复杂，部分矿物已经明显不是原地结晶形成。石英呈中-细粒，半-自形，常被硫化物溶蚀，该阶段晚期常见石英晶洞、梳状构造，且晶洞中常充填有方铅矿、闪锌矿、含银黝铜矿、黄铜矿等，说明在 NE-NEE 向构造中热液矿物结晶的空间要比主矿化阶段（II_1）充分。该阶段 82 个原生气液包裹体的均一温度为 145～288℃,平均为 194℃,均一为液相；冰点温度为-7.3～-1.1℃，平均为-4.0℃；盐度为 1.91～10.86%，平均 4.33%；流体密度为 0.78～0.96g/cm^3，平均为 0.92g/cm^3。为中低温低盐度流体。与主矿化阶段（II_1）相比，平均温度下降 47℃，平均盐度下降 3.44%，显示更多比例的大气水参与成矿。

虽然少量的 CO_2 不足以改变水溶液包裹体的基本特性，但它在矿化阶段围岩蚀变过程中却发挥着重要作用。无论是光学显微镜下观察，还是河南省有色金属地质勘查总院（2005）对沿脉坑道回收矿石进行的选矿试验，碳酸盐在多金属硫化物-石英脉两侧浅色蚀变岩中的含量一般大于绢云母，因此把浅色蚀变岩定为绢英岩（郭时然，1995；隋颖慧等，2000；陈衍景等，2003）都忽视了主矿化阶段极其重要的碳酸盐化。与较容易被注意到的晚阶段方解石（细）脉相比，在矿化阶段（II）蚀变岩中的大量、普遍的碳酸盐化却很容易被忽视。矿化阶段（II）更趋向于形成菱铁矿-菱镁铁矿或含铁白云石这类含铁镁（锰）碳酸盐蚀变矿物或含铁白云石细脉，形成的方解石脉相对较少；而晚阶段尽管方解石脉两侧也同样发育含铁镁碳酸盐蚀变矿物，但同时形成大量的方解石脉。另一方面，CO_2、HCO_2^-和 CO_3^{2-}是热液中重要的和普遍存在的矿化剂，它们对于许多成矿元素的搬运和沉淀起了重要作用（胡受奚等，2004）；虽然没有足够的事实显示 CO_2 在该类矿床成矿元素搬运和沉淀过程中具体起到什么作用，但在研究这一问题时 HCO_2^-、

CO_3^{2-}应该像 Cl^-一样同样被高度重视。

5.1.1.3 方解石-石英阶段（III）

矿物共生序列以方解石在石英之后沉淀为特征。在该阶段，在 NE-NEE 向构造中热液矿物结晶的空间依然很充分，方解石、石英常形成梳状、晶簇构造，说明 NE-NEE 向构造处于伸展环境，这时该区最大主应力方向仍应该为 NE-NEE。该阶段流体包裹体为气液两相盐水溶液包裹体，包裹体的均一温度变化范围为 129～208℃，平均为 163℃，均一为液相；冰点温度为-2.4～-0.8℃，平均为-1.5℃；盐度ω（NaCleq）为 1.40～4.03%，平均 2.50%；流体密度为 0.87～0.95g/cm^3，平均为 0.93g/cm^3。为低温低盐度水溶液流体。这与该阶段流体氢氧同位素（图 4-2）所显示的规律相一致，随着大气将水的不断加入，从 II 阶段到 III 阶段，水岩比值随之增大，流体中大气降水的比例愈来愈高，流体逐渐被冷却、稀释，包裹体均一温度和盐度都显著降低，氢、氧同位素也更加向雨水线靠近，此时热液中 Ag、Pb、Zn 浓度已非常低，一般不足以沉淀富集成矿。

总之，从包裹体类型来看，成矿流体从早期至晚期，热液性质从高温或高盐度流体逐步转变为含 CO_2 的 H_2O-NaCl-KCl 型盐水溶液，成矿热液带来的 CO_2 参与了流体-岩石反应，造成围岩发生菱铁矿-菱铁镁矿-含铁白云石化。成矿流体的活动可分为三个阶段：I 阶段在近 EW 向最大主压应力条件下，低温低盐度流体捕获了过饱和高盐度流体；II 阶段最大主压应力由近 EW 向转为 NNE 向，古大气水混入岩浆流体，流体发生剧烈变化，大量金属硫化物、硫盐和含铁碳酸盐沉淀出来，形成硫化物石英脉-蚀变岩型银铅锌矿床；III 阶段随着古大气水的不断混入，大气水比例逐渐增大，沉淀出大量的方解石和相对少量的石英。

5.1.2 成矿流体来源

氢氧同位素是判断流体来源的最为有效的指示剂。沙沟、铁炉坪、蒿坪沟矿床不同阶段流体的氢氧同位素组成（表 4-2）明显不同，反映出成矿流体来源的差异。5 件阶段（I）石英的 $\delta^{18}O$ 为 13.9～15.60‰，与石英平衡的流体 $\delta^{18}O_{H2O}$ 为 7.8～9.5‰，平均为 8.76‰；δD 为 -96～-84‰，平均为-89.4‰。与熊耳山花山花岗岩石英 600℃结晶的平衡水氢氧同位素组成（$\delta^{18}O$=6.6～8.5‰，δD=-64.7～-68.7‰）接近，而与结晶基底太华岩群混合岩和伟

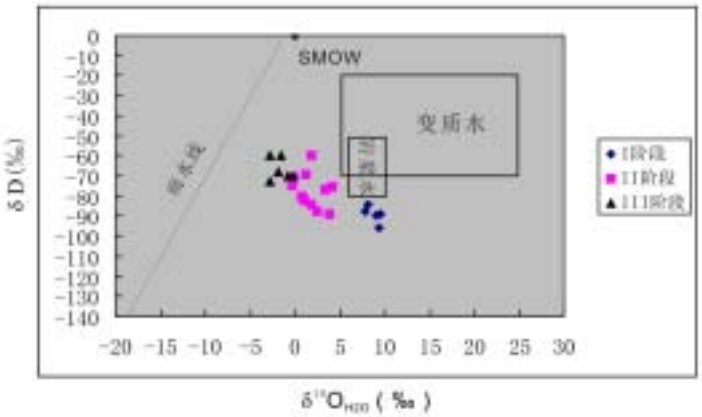

图5-1 沙沟、铁炉坪、蒿坪沟矿床成矿流体 $\delta^{18}O_{H2O}$-δD图

晶岩中石英包裹体水（$\delta^{18}O_{H2O}$=5.8～8.5‰，δD 变化范围-24.5～-68.7‰）相差较大，在 $\delta^{18}O_{H2O}$-δD（图 4-2）上落入岩浆水下侧稍许，说明成矿热液来源与花岗岩岩浆热液活动有关。II 阶段石英的 $\delta^{18}O$ 为 9.1～14.3‰，与石英平衡的流体 $\delta^{18}O_{H2O}$ 为-0.3～4.2‰，平均为 1.8‰，明显低于 I 阶段流体；δD 为-88.8～-59.8‰，平均为-77.2‰，高于早期流体；在 δ^{18}-δD 图上向雨水线靠近，大致位于岩浆水和雨水线中间，说明随着热液的演化，大气水参与成矿，与岩浆热液发生混合。III 阶段流体 $\delta^{18}O_{H2O}$ 为-2.7～-0.1‰，平均为-1.6‰；δD 为-73～-60‰，平均为-66.8‰；在 $\delta^{18}O_{H2O}$-δD（图 4-2）上更加靠近雨水线，说明随着成矿作用的进行，从 II 阶段到 III 阶段，在成矿温度和盐度明显降低的同时，氢、氧同位素也更加向雨水线靠近，表明 III 阶段较 II 阶段有更多的大气水加入，导致流体不断稀释，温度不断降低。总之，氢氧同位素组成强烈地支持岩浆和大气水两种流体均对成矿流体产生影响。

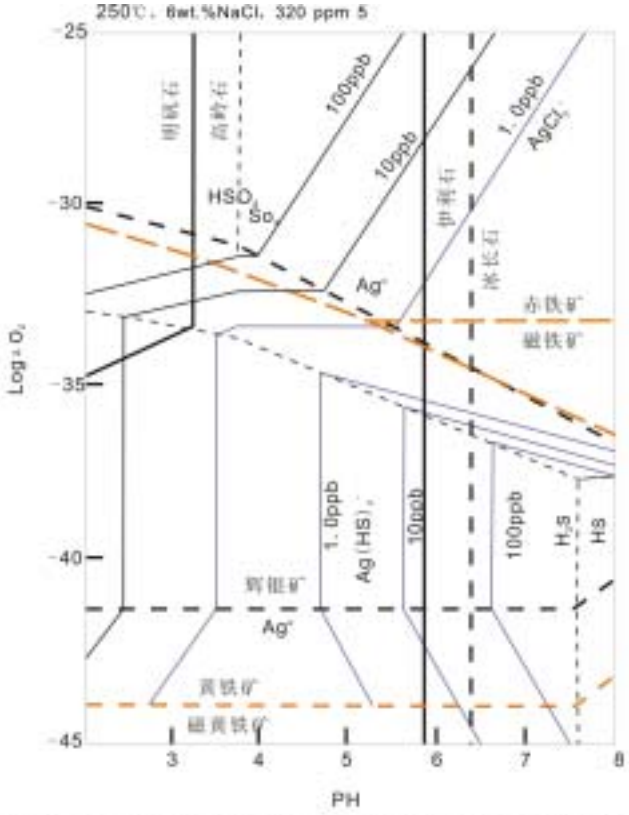

图 5-2 叠加有蚀变矿物和铁矿物稳定场的反映报温化物（黑线）和复硫化物（灰线）溶解度的氧活度-pH 图。赤铁矿、磁铁矿、黄铁矿和磁黄铁矿的稳定场用长虚线分开。自然银和辉银矿的稳定场用短虚线分开。蚀变矿物明矾石、高岭石、伊利石和冰长石的稳定场用粗线分开。（Rambarger，1991）

沙沟矿床 1 件 III 阶段方解石 $\delta^{13}C_{PDB}$ 为-2.5‰，假设其沉淀于 III 阶段的平均温度 163℃，根据低温条件方解石与 CO_2 之间的碳同位素分馏方程 $10^3\ln a=1.194\times10^6/T^2-3.63$（Faure，1986），求得平衡流体中 CO_2 的 $\delta^{13}C$ 为-5.3，说明有大气 CO_2 加入流体系统。沙沟矿床 1 件 III 阶段方解石 $\delta^{13}C_{PDB}$ 为-2.5‰；蒿坪沟矿床 1 件 III 阶段方解石的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 为-1.7‰；铁炉坪矿床 5 件 III 阶段方解石的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 为-0.6～-1.7‰，平均为 1.0‰。总之，这三个矿床 III 阶段方解石的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 介于-2.5～-0.58‰之间，平均-1.41‰，位于地幔源或花岗质岩浆流体与海相碳酸盐区（Keith et al.,1964）之间，可能表明在成矿晚阶段，来自花岗质岩浆的流体与海相碳酸盐发生了同位素交换，向 ^{13}C 增高的方向漂移。

5.1.3 成矿物质来源

由于沙沟矿床未见原生硫酸盐矿物出现，成矿发生在还原环境。热液矿床的金属来

源可以是深源和/或浅源，但确定一个特定矿床的具体来源通常是困难的（Barnes, 1997）。理论和实验研究显示同源硫化物和成矿流体之间的同位素交换反应可以达到平衡，而且平衡温度可以根据共生硫化物的 $\delta^{34}S$ 值来估计。大量实验结果表明，在硫同位素达到平衡时，硫化物的 $\delta^{34}S$ 相对含量应该按黄铁矿>闪锌矿>方铅矿的顺序递减（Sakai, 1968；Kajiwara and Krouse, 1971）。虽然无论是铁炉坪、蒿坪沟矿床还是沙沟矿床，硫化物 $\delta^{34}S$ 富集顺序基本为黄铁矿>闪锌矿或黄铜矿>方铅矿，但以矿物共生序列和流体包裹体分析为基础，本次研究确定主矿化阶段的温度为 145～357℃，这一温度范围低于这些硫化物同位素完全平衡所需温度（Field and Fifarek, 1985），而且矿物对平衡温度与流体包裹体均一温度相差较大，表明在成矿过程中硫化物 $\delta^{34}S$ 尚未达到完全平衡。

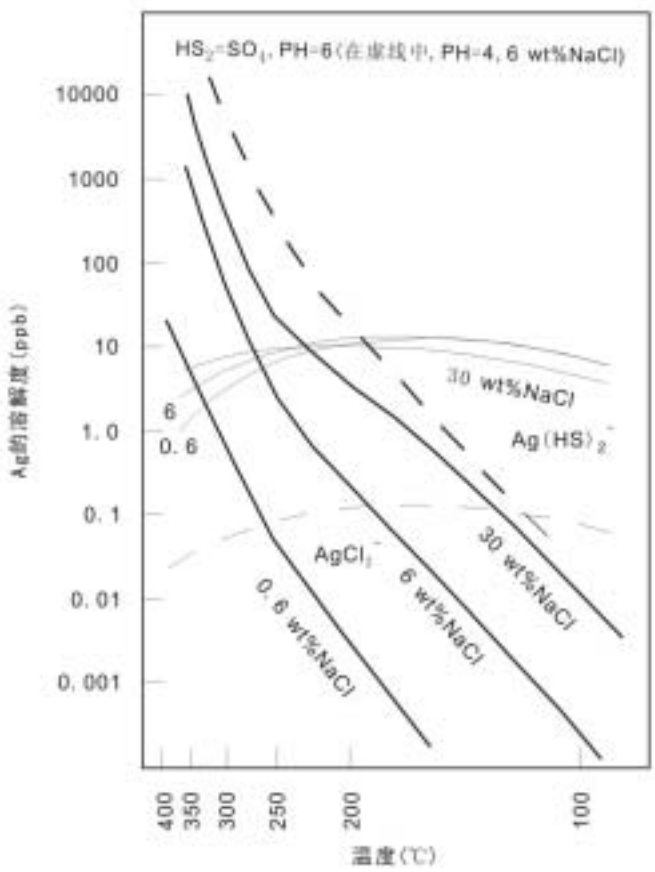

图5-3 银的氯化物（黑线）和银的复硫化物（灰线）在水溶液中的溶解度和温度、NaCl浓度、PH的函数关系图(Romberger, 1991)

由于可能受 pH 值和氧逸度的影响，单个矿物的 $\delta^{34}S$ 值不一定反应流体中的硫同位素组成。Ohmoto 等（1979）认为在矿物组合简单的情况下，矿物 $\delta^{34}S$ 平均值可以近似代表热液的总硫值。沙沟矿床各矿物 $\delta^{34}S$ 的均值为 0.73‰，更接近热液的总硫值，为幔源硫 0～2‰（郑永飞，1999；Hoefs,1997；Sakai et al.,1984；Ionov et al.,1992）。

5.1.4 成矿元素沉淀机制

无论成矿流体性质的演化，还是流体氢氧同位素组成均揭示成矿流体是由两端元流体混合而成，流体的混合以及混合导致的温度降低，可能是沙沟硫化物石英脉-蚀变岩型银铅锌矿沉淀的最有效机制。大气水的混合、稀释产生的冷却效应和流体上升后压力的降低，导致流体中成矿物质在断裂的有利部位沉淀。当深部流体上升并与大气降水发生

混合时，整体上温度逐渐降低，Cl 的配合物被 S 的配合物所代替。

图 5-3 显示，温度的降低对银从氯化物络合物中沉淀也是一种有效机制，而且从早阶段到晚阶段，流体包裹体均一温度也逐渐降低，说明温度的降低很可能是该矿床 Ag 沉淀的重要机制。

矿化阶段石英中流体包裹体盐度为 1.57~10.24NaCl Wt.%，可以为络离子的形成提供足够的的氯离子。图 5-4 显示，在一个氧逸度相对较高的、硫逸度较低的条件下，银作为氯化物络合物的溶解度增长到>100ppm，而且图中还显示以氯化物络合物运移的银可以通过 H_2S 活动性的升高而沉淀，这样的机制可以出现在伴随蒿坪沟爆破角砾岩进行的浅部脱气作用过程中。

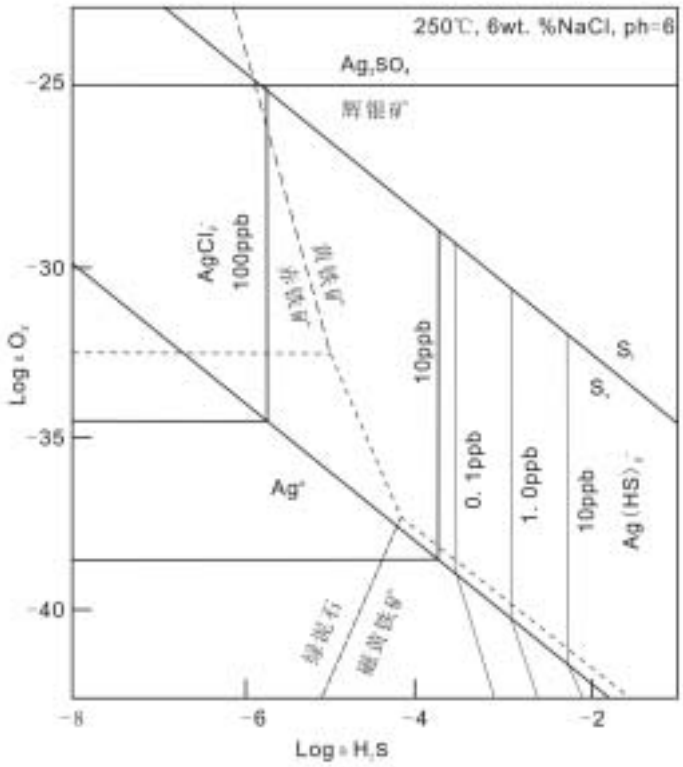

图 5-4 与辉银矿、铁的硫化物和氧化物及绿泥石稳定场相对应的，反映在不同银浓度下银氯化物（粗线）和银复硫化物（细线）溶解度的Log∑H_2S-log∑O_2图（Romberger,1991）

大量的研究表明，流体的不混溶作用对金属元素的沉淀具有重要的制约作用，是金属的重要富集机理之一（张德会，1997）。由原来均一的一种流体变为两种或两种以上不均匀流体，从而破坏了原有的平衡状态，导致某些有用组分沉淀成矿（张文淮等，1996）。尽管流体沸腾是硫化物沉淀的常见机制（Drummond and Ohmoto，1985），但沙沟矿床只是在矿化阶段 II 偶尔见到少数含 CO_2 三相包裹体，虽然含 CO_2 三相包裹体的均一温度和与其共生的气液两相包裹体也相一致，说明矿化阶段流体可能存在盐水溶液和 CO_2 的不混溶，但主矿化阶段的含 CO_2 三相包裹体的含量毕竟很少，CO_2 和盐水溶液的不混溶很难成为主矿化阶段 Ag、Pb、Zn 等沉淀的重要机制。然而，在石英 Q_1 中含子矿物三相包裹体、原生纯气体包裹体及石英 Q_2 中的次生富气或纯气体包裹体面，却显示岩浆流体的突然减压沸腾很可能是 S17 等近 EW 向石英-黄铁矿-（方铅矿）脉沉淀的重要机制。

在成矿热液与围岩发生水-岩反作用的同时，也改变了自身的物理化学环境，从而使配合物发生不稳定而沉淀成矿。在斜长石绢云母化、铁镁质矿物碳酸盐化的过程中，由

于绢云母化本质上属于 K^+、H^+交代，而碳酸盐化过程中又要消耗 CO_2^{2-}或 HCO_2^-，加上脱 CO_2 气体的进行，成矿流体的 pH 升高，由图 5-2 可知，流体 pH 的升高可以导致以氯化物络合物运移的银发生沉淀。

另一种次要的机制可能是流体的去 CO_2 气体作用，至少是在阶段（II 和 III）。如前所述，矿化阶段硫化物-石英脉两侧发育大量的铁镁碳酸盐蚀变矿物，而且矿脉局部可见板状含铁白云石，这些都揭示去 CO_2 气体作用的广泛发育。一般认为，由于 pH 的升高，去 CO_2 气体作用可能对方解石的沉淀起到重要作用。

总之，古大气水的与岩浆流体的混合及混合导致的温度降低很可能是沙沟硫化物石英脉-蚀变岩型银铅锌矿沉淀的主要机制，另外水-岩反应导致的 pH 的升高和伴随爆破角砾岩进行的浅部脱气作用过程中 H_2S 活动性的增强，可能是银沉淀的重要机制。

5.1.5 成矿时代及成矿动力学背景

中国东部大规模成矿的地球动力学背景是一个大家关注的科学问题，沙沟与蒿坪沟、铁炉坪银（金）铅（锌）矿具有相同的成矿特征和控矿要素，是同一成矿时期和成矿环境的产物，是该时间段成矿的组成部分（毛景文等，2006）。陈衍景等(2003)通过稳定同位素研究认为以铁炉坪为代表的银矿形成于华南与华北古板块的碰撞过程中挤压向伸展转变期。但毛景文等（2006）在沙沟 S16 号脉选取绢云母和铬云母进行 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄测定，获得坪年龄为(145.0±1.1)Ma 和(147.0±1.5)Ma，相应的等时线年龄为(145.2±2.5)Ma 和(147.6±2.3)Ma；认为这组矿床形成于中国东部“南北向构造体制转换为濒太平洋构造体制”的构造体制大转折时期。

5.2 结论

侏罗纪与白垩纪转折时期的沙沟 Ag-Pb-Zn 矿床属于薄脉状后生低硫化物矿床。容矿围岩主要为新太古界太华群黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、角闪岩，其次为侵入其中的基性岩脉、闪长岩等。矿体及围岩蚀变带严格受 NNE-NE 或近 SN 向破碎带控制，破碎带两侧发育典型的中低温热液蚀变，近矿脉围岩蚀变的类型主要有硅化、碳酸盐化、绢云母化和黄铁矿化及其叠加类型。银、铅、锌矿化与硅化、碳酸盐化、绢云母化紧密相关。

在原生矿石中矿石矿物主要为方铅矿、闪锌矿，其次为黄铁矿、黄铜矿、含银黝铜矿、硫锑铜银矿、浓红银矿、辉银矿、自然银、黝铜矿、磁铁矿 、斑铜矿、毒砂 、磁铁矿等；脉石矿物主要有石英、碳酸盐矿物（方解石、菱铁矿-菱铁镁矿、含铁白云石）、

绢云母、（铬）白云母，其次有斜长石、绿泥石、角闪石、黑云母、锆石 、金红石 、磷灰石等；表生矿物有褐铁矿、硬锰矿、白铅矿、铅矾、针铁矿、黑锌锰矿、赤铁矿 、孔雀石、铜蓝、蓝铜矿、高岭石等。

为典型后生热液矿床的结构和构造：常见的结晶结构有自形晶结构、半自形晶结构、它形晶结构、自形晶粒状结构、半自形晶粒状结构、填隙结构、包含结构；常见的交代结构有镶边结构（反应边结构）、溶蚀交代结构、交代骸晶结构、交代乳滴状结构、交代网状、格状、筛状、交叉结构。矿石构造主要有块状构造、（细脉）浸染状构造、（网）脉状构造、条带状构造、角砾状构造、团块状构造、透镜状构造、泥状构造和梳状、晶簇、晶洞构造。

通过对矿床矿脉、矿体、矿物、矿石结构和构造、围岩蚀变等的详细描述和综合分析，本文将该矿床热液阶段的矿物共生序列分为主矿化前的石英-黄铁矿-（方铅矿）阶段（I）、闪锌矿-粗粒方铅矿-石英-黄铁矿-黄铜矿-铁镁碳酸盐主矿化阶段（II_1）、方铅矿-石英-闪锌矿-黄铜矿-银矿物-铁镁碳酸盐主矿化阶段（II_2）和方解石-石英阶段（III）。

石英-黄铁矿-（方铅矿）阶段（I）

本阶段石英 Q_1 中存在两相（LV）和三相（LVH）流体包裹体，这两种包裹体可以认为是捕获一种盐度过饱和流体的结果。δD 和 $\delta^{18}O$ 值、S 同位素比值以及该区中生代侵入体的同位素组成，强烈地支持这种流体起源于岩浆。如此高的盐度很可能是通过岩浆分异流体的突然减压而形成（Fournier，1999）。均一温度（LVH→LH）为 108～246℃，平均为 157℃；子矿物消失温度为 160～290℃，平均 225℃；由子矿物溶解温度计算盐度（Sterner et al.,1988）为 30.06～37.40%，平均为 33.25%。

乳白色石英 Q_2 中原生包裹体的均一温度为 285～360℃，平均为 325℃。而且，若以 325℃来计算铁炉坪矿床与该种石英矿物平衡的流体的氧同位素组成 $\delta^{18}O_{H2O}$，$\delta^{18}O_{H2O}$ 落入岩浆范围，氢同位素也位于岩浆流体范围附近。另外，沙沟矿床 4 件黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 为 4.4～6.3‰，平均为 5.6‰，稍高于岩浆硫（4‰）（Taylor,1987）。将这种流体理解为以岩浆流体为主导是合理的。

在石英 Q_1 中含子矿物三相包裹体、原生纯气体包裹体及石英 Q_2 中的次生富气或纯气体包裹体面，显示岩浆流体的突然减压沸腾很可能是 S17 等近 EW 向石英-黄铁矿-（方铅矿）脉沉淀的重要机制。

主矿化阶段（II_1 和 II_2）

主矿化阶段（II）流体包裹体一般为气液两相包裹体，气相百分数为 5～15%。该阶

段流体包裹体反映了主成矿阶段流体的基本特征，结合包裹体气相和液相成分色谱分析以及包裹体初融温度，主矿化阶段流体应该为中-低温低盐度含 CO_2 的 H_2O-NaCl-KCl 体系。该阶段流体氢氧同位素在 δ^{18}-δD 图上向雨水线靠近，大致位于岩浆水和雨水线中间，说明随着热液的演化，大气水参与成矿，与岩浆热液发生混合，成矿流体温度、盐度显著下降，大量硫化物、硫盐矿物相继沉淀。

主矿化阶段（II_1）近 SN 向构造中发育条带状闪锌矿和方铅矿，主要是沿张剪性裂隙原地结晶而成的，是锌的主要成矿阶段，银、铅的重要成矿阶段。该阶段原生气液两相包裹体的均一温度为 185～357℃，平均 241℃，均一为液相；盐度 4.65～10.11%，平均为 7.77%；流体密度为 0.80～0.94g/cm^3，平均为 0.89g/cm^3。为中温低盐度低密度流体。主矿化阶段（II_2），为银、铅的主要成矿阶段，矿体常呈灌入式充填于 NE-NEE 构造中，硫化物-石英脉两侧的蚀变岩厚度变小，沉淀的矿物种类变复杂，部分矿物已经明显不是原地结晶形成。石英呈中-细粒，半-自形，常被硫化物溶蚀，该阶段晚期常见石英晶洞、梳状构造，且晶洞中常充填有方铅矿、闪锌矿、含银黝铜矿、黄铜矿等，说明在 NE-NEE 向构造中热液矿物结晶的空间要比主矿化阶段（II_1）充分。该阶段原生气液包裹体的均一温度为 145～288℃，平均为 194℃，均一为液相；盐度为 1.91～10.86%，平均 4.33%；流体密度为 0.78～0.96g/cm^3，平均为 0.92g/cm^3。为中低温低盐度流体。与主矿化阶段（II_1）相比，平均温度下降 47℃，平均盐度下降 3.44%，显示更多的大气水参与成矿。

银铅锌矿化主要发生在 145～295℃，属中-低温热液矿床的成矿温度范畴。成矿流体与岩浆作用有关，早期以岩浆水为主，中晚期为岩浆水与大气水的混合。古大气水与岩浆流体的混合和混合导致的温度降低很可能是沙沟硫化物石英脉-蚀变岩型银铅锌矿沉淀的主要机制，另外，水-岩反应导致的 pH 的升高和伴随爆破角砾岩进行的浅部脱气作用过程中 H_2S 活动性的增强，也可能是银沉淀的重要机制。

方解石-石英阶段（III）

共生序列以方解石在石英之后沉淀为特征。在该阶段，在 NE-NNE 向构造中热液矿物结晶的空间依然很充分，方解石、石英常形成梳状、晶簇构造。该阶段流体包裹体为气液两相盐水溶液包裹体，气相百分数<10%，均一温度变化范围为 129～208℃，平均为 163℃，均一为液相；盐度ω（NaCleq）为 1.40～4.03%，平均 2.50%；流体密度为 0.87～0.95g/cm^3，平均为 0.93g/cm^3。包裹体均一温度和盐度都显著降低，为低温低盐度水溶液流体。在 $\delta^{18}O_{H2O}$-δD 图上更加靠近雨水线，说明随着成矿作用的进行，从 II 阶段到 III 阶段，成矿温度和盐度明显降低，氢、氧同位素也更加向雨水线靠近，表明 III 阶段较

II 阶段有更多的大气水加入，导致流体更加冷却、稀释，温度和盐度明显降低。

综上所述，沙沟矿床是早白垩世早期与岩浆热液有关的中低温热液脉状充填-交代型银铅锌矿床。同时，本文想强调将详细的地质观察和独立的地球化学手段相结合去更好地理解岩浆流体在许多矿床形成过程中的作用是非常必要的。

致　　谢

衷心地感谢导师毛景文教授。三年来，导师在学习和生活上都给了我莫大的关怀和指导，使我在理论知识和科研能力上都得到很大提高。

叶会寿高级工程师无论在室内还是在野外，都给予我很大的帮助和指导，使本论文得以顺利完成，在此表示诚挚的谢意。感谢李厚民研究员、谢桂青副研究院、李永峰博士、郭保健博士、李蒙文博士、代军治博士、张长青博士、刘珺博士、郑建民博士、赵财胜博士、陈懋弘博士、郑榕芬硕士、陈莉硕士、徐林刚硕士 、杨国强硕士、程彦博硕士、杨宗喜硕士、向君峰硕士、章伟硕士在生活和学习上给予的帮助。感谢中国地质大学张文淮教授、薛春纪教授对论文的指导。感谢诸慧燕老师在流体包裹体显微测温过程中提供的热情帮助。

感谢河南发恩德矿业有限公司冯锐董事长 、高建国总经理 、刘灵恩和王建文总工程师以及刘金平、吴开福、吕俊成等工程师在野外工作期间提供的支持和帮助。论文得到国家重点自然科学基金项目(编号 40434011)“ 华北及邻区晚中生代大规模成矿作用与岩石圈伸展耦合关系 ”的资助。

参考文献

【1】 P. Ramdohr 著. 谢宇平, 贺义兴, 李高山, 等译. 金属矿物及其交生. 长春地质学院图书馆. 长春：1986，1～73

【2】 陈旺，郭时然，崔毫. 豫西熊耳山铁炉坪、蒿坪沟矿床银铅矿石稳定同位素研究. 有色金属矿产与勘查，1996，5(4)：213～218

【3】 陈衍景，FrancoPIRAJNO,隋颖慧. 河南铁炉坪银矿床的地质和 D-O-C 同位素体系及成因. 地质学报，2005，144

【4】 陈衍景，富士谷. 豫西金矿成矿规律. 北京：地震出版社，1992，1～185

【5】 陈衍景，郭光军，李欣. 华北克拉通花岗绿岩地体中中生代金矿床的成矿地球动力学背景. 中国科学 D 辑，1998，28(1)：35～40

【6】 陈衍景，隋颖慧, PIRAJNO F. CMF 模式的排他性依据和造山型银矿实例:东秦岭铁炉坪银矿同位素地球化学. 岩石学报，2003，19(3)：551～568

【7】 范宏瑞，谢奕汉，郑学正，王英兰. 河南祁雨沟热液角砾岩体型金矿床成矿流体研究. 岩石学报，2000，016（04）：559～563

【8】 郭保健, 戴塔根, 徐孟罗, 等. 熊耳山北坡拆离断层带地球化学特征及其与金银矿化的关系[J]. 矿产与地质，1997，11(1)：20～25

【9】 郭时然. 洛宁铁炉坪银铅矿床围岩蚀变分带特征. 河南地质，1995，13(1)：9～14

【10】 河南区域地质志. 北京：地质出版社，1989，12～68

【11】 河南省有色金属地质勘查总院. 河南省洛宁县沙沟西银铅矿区地质普查 2003 年度成果简报. 河南：2003, 1～60

【12】 河南省有色金属地质勘查总院. 河南省洛宁县沙沟-月亮沟银铅矿区详查报告. 河南：2005

【13】 胡受奚. 交代蚀变岩岩相学. 北京：地质出版社，1980，36～46

【14】 黄典豪, 胡世华. 夏塞银多金属矿床中硫化物和硫盐系列矿物特征及其意义. 矿床地质，2000，19(4)：363～375

【15】 黄典豪. 热液脉型铅-锌-银矿床富铁闪锌矿中硫化物包裹体成因探讨. 矿床地质，1999，18(3)：244～252

【16】 刘灵恩，胡国民，支风岐. 豫西寨凹隐伏岩体对周边银多金属矿的控矿作用. 矿产与地质，2004，18(1)：31～34

【17】 鲁安怀，陈光远. 焦家式金矿中铬铝云母化学成分的标型性. 岩石矿物学杂志，1994，13(4)：353～361

【18】 吕志成, 张培萍，刘丛强, 等. 额仁陶勒盖银矿床银矿物的矿物学特征及形成条件. 地质地球化学，2000，28(3)：41～47

【19】 罗铭玖，黎世美, 卢欣祥, 等. 河南省主要矿产的成矿作用及矿床成矿系列. 北京: 地质出版社, 2000，15～56

【20】 毛景文，谢桂清，张作衡，等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其动力学背景[J]. 岩石学报，2005，21(1)：169～188

【21】 裴荣富，吴良士. 矿物共生和矿物共生组合研究与成矿年代学. 矿床地质，1995，14(2)：185～188

【22】 隋颖慧，王海华，高秀丽，等. 河南铁炉坪银矿成矿流体研究及其对碰撞造山成岩成矿与流体作用模式例证. 中国科学（D）辑，2000，30 增刊：82～90

【23】 王志光, 张录星. 熊耳山变质核杂岩构造研究及找矿进展. 有色金属矿产与勘查，1999，8(6)：388～392

【24】 王志光，崔毫，徐孟罗. 华北地块南缘地质构造演化与成矿[M]. 北京：冶金工业出版社，1997，88～254

【25】 徐孟罗，李红超，王志光，等. 豫西金银多金属矿床成矿系列及其共生组合规律. 矿产与地质，1997，58(11)：73～78

【26】 张理刚.稳定同位索在地质科学中的应用.西安:陕西科学技术出版社，1985，267

【27】 支风岐，刘灵恩，索勇. 河南省熊耳山西段沙沟西银铅矿区地质特征及找矿前景分析矿产与地质，2004，18(1)：35～38

【28】 中国地质科学院. 硫化物和硫盐矿物的晶体化学及其相平衡. 地球科学国际交流(八). 1984: 1～30

【29】 Andy Davis, Steven O. Helgen. Discriminating between Copper and Silver Mill Tailings in Silver Bow Creek Overbank Deposits, Butte, Montana, U.S.A..Environmental Forensics 2001, 2: 249～259

【30】 Antonio Sanchez Navas, B.J. Reddy, Fernando Nieto. Spectroscopic study of chromium, iron, OH, fluid and mineral inclusions in uvarovite and fuchsite. Spectrochimica Acta Part A 2004, 60: 2261～2268

【31】 D. Santhiya, S. Subramanian,l and K. A. Natarajan . Surface Chemical Studies on Sphalerite and Galena Using Extracellular Polysaccharides Isolated from Bacillus polymyxa Journal of Colloid and Interface Science, 2002, 256: 237～248

【32】 Gabriel Voicu, Marc Bardoux, Ross Stevenson .Litgostratigraphy, geochronology and gold metallogeny in the northern Guiana Shield, South America: a review. Ore Geology Reviews, 2001, 18: 211～236

【33】 Goldfarb RJ, Groves DI, Cardoll S. Orogenic gold and geologic time; a global synthesis. Ore Geol Rev., 2001, 18: 1～75

【34】 Kay SM, Mpodozis C. Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust. GSA Today, 2001, 11: 1～10

【35】 Kerrich R, Goldfarb R, Groves D, Garwin S, Jia YF. The characteristics, origins and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. Sci. China(Ser. D), 2000, 43(supp.); 1～68

【36】 Kula C. Misra. Understanding Mineral Deposits. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000, 131～142

【37】 Leon Dejonghe. zinc–lead deposits of Belgium Ore Geology Reviews, 1998, 12: 329～354

【38】 Li C, Chen YJ, He SD. East Qinling-Dabieshan lithosphere delaminating age, mechanism and direction(petrological evidences and stipulation. Chinese J. Geochem., 2001, 20: 59～72

【39】 Ni P, Fan JG, Tian JH. Mesozoic tectonic-hydrothermal activity driven gold metallogenesis in Dandong area, south Liaoning; evidence from FIP. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16: 506～512(in Chinese with English abstract)

【40】 Nie Feng-Jun, Jiang Si-Hong, Su Xin-Xu. Geological features and origin of gold deposits occurring in the Baotou–Bayan Obo district, south-central Inner Mongolia, People's Republic of China. Ore Geology Reviews 2002, 20: 139～169

【41】 Ohmotto H, Rye R0. Isotopes of sulphur and carbon. In; Barnes HL(ed.).Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. New York：John Wiley, 1979, 509～567

【42】 Pettke T, Diamond LW，Krameis JD. Mesothermal gold lodes in the north-western Alps; A review of genetic constraints from radiogenic isotopes. Eur. J. Mineral, 2000, 12: 213～230

【43】 Pirajno F, Bagas L. Cold and silver metallogeny of the South China Fold Belt; a consequence of multiple mineralizing events? Ore Geol. Rev., 2002, 20: 109～126

【44】 Rui ZY, Goldfarb RJ, Qiu YM. Paleozoic-early Mesozoic gold deposits of the Xinjiang

Autonomous Region, northwestern China. Miner. Deposita, 2002, 37: 393～418

【45】 S. Lakshmi Reddy, R. Rama Subba Reddy, G. Siva Reddy，etc.l. Optical absorption and EPR spectra of fuchsite. Spectrochimica Acta Part A, 2003, 59: 2603～2609

【46】 S.A. Bolorunduro, D.B. Dreisinger, G. Van Weert. Fundamental study of silver deportment during the pressure oxidation of sulphide ores and concentrates. Minerals Engineering, 2003, 16: 695～708

【47】 S.E. Phillipson, S.B. Romberger. Volcanic stratigraphy, structural controls, and mineralization in the San Cristobal Ag-Zn-Pb deposit, southern Bolivia. Journal of South American Earth Sciences, 2004, 16: 667-683

【48】 S.R. Grano, C.A. Prestidge, J.Ralston. Sulphite modification of galena surfaces and its effect on flotation and xanthate adsorption. Int. J.Miner. Process, 1997, 52: 1～29

【49】 Stephen E. Kesler, Stephen L. Chryssoulis, Grigore Simon. Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate. Ore Geology Reviews, 2002, 21: 103～124

【50】 Taylor H P. Oxygen and hydrogen isotope relationships. In Barnes H L(ed.), Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 2nd Edition. NewYork: Wiley, 1979, 236~277

【51】 Townley BK, Godwin CI. Isotope characterization of lead in galena from ore deposits of the Aysen Region, southern Chile. Miner Deposits, 2001, 36: 45～57

【52】 Wang HH, Chen YJ, Gao XL. The isotope geochemistry of the Kangshan gold deposit, Henan and its illustration of the CPMF model. Mineral Deposit, 2001, 20: 190～198(in Chinese)

【53】 Xie QQ, Xu XC, Yue SC. Isochron age of the Laowan gold deposit and laowan granite, Tongbai region, Henan province and its implications. Geological Journal of China Universities, 2000, 6: 546～553 (in Chinese with English abstract)

【54】 Xu G., Zhou J.. The Xinqiao Cu–S–Fe–Au deposit in the Tongling mineral district, China: synorogenic remobilization of a stratiform sulfide deposit. Ore Geology Reviews, 2001, 18: 77～94

【55】 Yiming Zhao, Yinan Zhang, Chengsi Bi. Geology of gold-bearing skarn deposits in the middle and lower Yangtze River Valley and adjacent regions. Ore Geology Reviews, 1999, 14: 227～249

【56】 Yongjun Peng, Stephen Grano, Daniel Fornasiero, John Ralston . Control of grinding conditions in the flotation of galena and its separation from pyrite.Int. J. Miner. Process, 2003, 70: 67~82

【57】 Yuanming Pan, Ping Dong. The Lower Changjiang YangzirYangtze River metallogenic belt, east central China: intrusion- and wall rock-hostedCu–Fe–Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. Ore Geology Reviews, 1999, 15: 177～242

【58】 Zhang Chengli, Gao Shan, Zhang Guowei, etc.l. Geochemistry of early Paleozoic alkali dyke swarms in south Qinling and its geological significance. Science in China(Series D), 2003, 46(12): 1292～1306

【59】 Zhang FX, Zhang J. Geological-geochemical characteristics of Carlin- and Carlin-like-type gold deposits in South Qinling Mountains. Chinese J. Geochem., 2003, 22: 11~22

【60】 Zhang JJ, Zheng YD, Liu SW. Mesozoic tectonic evolution and ore-deposits formation in the gold mine field of Xiaoqinling. Chin. J. Geol, 2003, 38: 74～84(in Chinese with English abstract)

【61】 Zhang LC, Ii JS, Li HQ, etc.l. Geochemical characteristics and source of two-type ore-fornung fluids in Kanggultage gold ore belt, east Tianshan. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16: 535~541(in Chinese

with English abstract)

【62】 Zhao GC, Sun M, Wilde SA. Reconstruction of a preRodinia supercontinent: New advances and perspectives. Chin. Sci. Bull, 2002, 47: 1585~1588

附表

阶段（I）主矿物石英 Q_1 中三相（LVH）流体包裹体显微测温部分原始数据

样号	取样位置	形状	大小/μm	气液比	均一温度（LVH→LH）/℃	子晶消失	盐度/%	密度/g*cm^{-3}
81-1-1	节理面	规则	12×12	5	151	188	31.29	1.16
81-1-2	节理面	规则	14×10	5	108	200	31.87	1.20
81-1-3	节理面	规则	6×4	5	137	215	32.65	1.19
81-1-4	节理面	规则	12×6	5	153	200	31.87	1.17
81-1-5	节理面	规则	10×6	5	140	228	33.37	1.19
81-1-6	节理面	规则	8×6	5	148	160	30.06	1.15
81-1-7	节理面	规则	8×5	5	134	231	33.54	1.20
81-1-8	节理面	规则	12×6	5	139	227	33.31	1.19
81-1-9	节理面	规则	8×8	5	136	242	34.19	1.20
81-1-10	节理面	规则	7×5	5	113	226	33.25	1.21
81-1-11	节理面	规则	10×8	5	117	233	33.65	1.21
81-1-12	节理面	规则	12×10	5	112	219	32.87	1.21
81-2-1	节理面	规则	6×6	5	160	162	30.14	1.15
81-2-2	节理面	规则	7×7	5	149	161	30.10	1.15
81-2-3	节理面	不规则	6×4	5	125	182	31.01	1.18
81-2-4	节理面	规则	6×6	5	157	171	30.52	1.15
81-2-5	节理面	规则	5×5	5	142	168	30.39	1.16
81-2-6	节理面	不规则	14×8	5	109	186	31.20	1.19
81-2-7	节理面	规则	8×6	5	137	218	32.81	1.19
81-2-8	节理面	规则	12×8	5	146	160	30.06	1.16
81-2-9	节理面	规则	8×6	5	134	221	32.98	1.19
38-1-1	S17	不规则	8×7	5	162	185	31.15	1.16
38-1-2	S17	规则	8×8	5	140	228	33.37	1.19
38-1-3	S17	不规则	10×8	10	260	190	31.39	1.07
38-1-4	S17	不规则	8×6	5	156	160	30.06	1.15
38-1-5	S17	规则	6×4	10	238	225	33.20	1.11
38-1-6	S17	规则	10×7	5	141	280	36.68	1.23
38-1-7	S17	规则	8×6	5	157	198	31.77	1.16
38-2-1	S17	规则	10×8	5	143	170	30.48	1.16

阶段（I）主矿物石英 Q_1 中三相（LVH）流体包裹体显微测温部分原始数据

样号	取样位置	形状	大小/μm	气液比/%	均一温度（LVH→	子晶消失温	盐度/%	密度/g*cm^{-3}
38-2-2	S17	不规则	10×8	5	128	172	30.57	1.17
38-2-3	S17	不规则	16×10	5	159	210	32.39	1.17
38-2-4	S17	不规则	18×14	5	160	203	32.02	1.17
38-2-5	S17	不规则	20×8	5	230	281	36.75	1.15
38-2-6	S17	规则	6×4	5	168	217	32.76	1.17
38-2-7	S17	规则	4×3	5	144	245	34.37	1.20
38-2-8	S17	规则	7×6	5	191	185	31.15	1.13
38-2-9	S17	规则	8×6	5	120	246	34.43	1.22
38-2-10	S17	规则	10×8	5	125	225	33.20	1.20
38-2-11	S17	规则	5×4	5	178	205	32.13	1.15
38-2-12	S17	不规则	12×6	20	253	240	34.07	1.10
38-2-13	S17	不规则	12×8	10	256	237	33.89	1.10
38-2-14	S17	不规则	14×10	5	236	250	34.68	1.13
38-2-15	S17	规则	12×8	15	267	281	36.75	1.12
32-2-16	S17	规则	5×4	10	169	290	37.40	1.21
38-2-17	S17	规则	5×5	10	180	275	36.33	1.19
48-1	S17	不规则	12×8	5	157	225	33.20	1.18
48-2	S17	不规则	10×8	5	180	249	34.62	1.18
48-3	S17	规则	8×6	5	195	205	32.13	1.14
48-4	S17	不规则	10×10	5	147	244	34.31	1.20
48-5	S17	规则	8×6	5	198	258	35.19	1.17
48-6	S17	规则	10×7	5	180	270	35.99	1.19
48-7	S17	规则	10×5	5	208	255	36.00	1.17
48-8	S17	规则	6×4	5	197	250	34.68	1.16
48-9	S17	规则	6×5	5	200	237	33.89	1.15
48-10	S17	规则	5×3	10	169	240	34.07	1.18
48-11	S17	不规则	10×10	5	189	235	33.77	1.16
48-12	S17	长方	10×4	5	172	246	34.43	1.18
48-13	S17	不规则	14×8	5	165	230	33.48	1.18
48-14	S17	规则	6×5	5	189	232	33.60	1.16
48-15	S17	长方	10×8	5	175	290	37.40	1.21
48-16	S17	规则	7×4	5	197	237	33.89	1.15

阶段（I）石英 Q_1 中两相（LV）原生流体包裹体显微测温部分原始数据

样号	取样位置	形状	大小/μm	气液比/%	均一温度/℃	冰点温度/℃	盐度/%	密度/g*cm^{-3}	备注
B1-1		规则	6	5	179	-	-	-	
B1-2		规则	6	5	178	-	-	-	
B1-3		规则	6	10	183	-4.2	6.74	0.93	
B1-4		规则	6	10	178	-4.0	6.45	0.94	
B1-5		不规则	4	10	190	-4.4	7.02	0.93	
B1-6		规则	6	5	174	-4.2	6.74	0.94	
B1-7		不规则	8	5	185	-	-	-	
B1-8		不规则	8	5	188	-4.5	7.17	0.93	
B1-9		不规则	6	5	184	-4.8	7.59	0.94	
B1-10		规则	8	5	188	-4.8	7.59	0.93	
B1-11		规则	6	5	178	-4.6	7.31	0.94	
B1-12		不规则	4	5	174	-	-	-	
B1-13		规则	4	5	175	-	-	-	
B2-1		不规则	10	5	168	-7.3	10.86	0.98	
B2-2		规则	6	5	168	-7.5	11.10	0.98	
B2-3		规则	4	5	147	-	-	-	
B2-4		规则	6	5	149	-7.0	10.49	0.99	
B2-5		规则	8	5	151	-7.1	10.61	0.99	
B2-6		规则	4	5	166	-	-	-	
B2-7		不规则	6	5	158	-	-	-	
B2-8		不规则	14	10	193	-5.5	8.55	0.94	
B2-9		不规则	12	10	188	-5.5	8.55	0.94	
B2-10		规则	8	5	182	-5.6	8.68	0.95	
B2-11		不规则	8	5	198	-	-	-	
B2-12		不规则	6	5	181	-	-	-	
B2-13		不规则	8	5	185	-	-	-	

阶段（I）石英 Q_1 中两相（LV）次生流体包裹体显微测温部分原始数据

样号	取样位置	形状	大小√μm	气液比/%	均一温度/℃	冰点温度/℃	盐度/%	密度/g*cm^{-3}	备注
B3-1		不规则	4	5	176	-	-	-	
B3-2		四边形	6	5	178	-7.8	11.46	0.97	
B3-3		四边形	6	5	178	-7.6	11.22	0.97	
B3-4		不规则	16	10	252	-7.9	11.58	0.89	
B3-5		不规则	14	10	250	-7.5	11.10	0.89	
B3-6		规则	8	5	179	-8.0	11.70	0.97	
B3-7		不规则	6	5	176	-8.1	11.81	0.98	
B3-8		不规则	10	10	236	-	-	-	
B3-9		不规则	20	5	198	-7.9	11.58	0.95	
B3-10		不规则	10	5	196	-8.1	11.81	0.96	
B3-11		规则	12	5	192	-	-	-	
B3-12		规则	4	5	184	-	-	-	
B3-13		不规则	8	5	178	-8.0	11.70	0.98	
B3-14		不规则	8	5	174	-7.9	11.58	0.98	
B3-15		规则	6	5	185	-8.0	11.70	0.97	
B3-16		不规则	4×6	10	230	-7.7	11.34	0.92	
B3-17		不规则	3×5	10	227	-7.3	10.86	0.92	

阶段（I）主矿物石英 Q_2 中两相（LV）原生流体包裹体显微测温原始数据

样号	取样位置	形状	大小√μm	气液比/%	均一温度/℃	冰点温度/℃	盐度/%
1-1	-	次圆	3	5	315	-	-
1-2	-	不规则	4	5	345	-	-
1-3	-	三角	4	60	320	-	-
1-4	-	规则	4	5	360	-	-
1-5	-	规则	4	5	285	-	-

主矿化阶段(II_1)闪锌矿中两相（LV）原生流体包裹体显微测温原始数据

样号	取样位置	形状	大小√μm	气液比/%	均一温度/℃	冰点温度/	盐度/%	密度
2-1	S16W	规则	4×4	20	272	-	-	-
2-2	S16W	规则	2×4	10	346	-	-	-

2-3	S16W	规则	4×4	10	227	-	-	-
样号	取样位置	形状	大小/μm	气液比/%	均一温度/℃	冰点温度/	盐度/%	密度
2-4	S16W	规则	4×6	10	284	-	-	-
2-5	S16W	不规则	2×4	10	288	-	-	-
2-6	S16W	不规则	4×6	20	245	-	-	-
2-7	S16W	规则	2×4	10	257	-	-	-
2-8	S16W	规则	4×6	20	310	-	-	-
2-9	S16W	不规则	4×12	20	295	-	-	-
2-10	S16W	不规则	6×8	20	251	-	-	-
2-11	S16W	规则	2×2	10	247	-	-	-
2-12	S16W	不规则	2×6	20	239	-	-	-
2-13	S16W	规则	4×5	20	235	-	-	-
2-14	S16W	不规则	2×4	10	249	-	-	-
2-15	S16W	规则	2×4	20	357	-	-	-

主矿化阶段(II_1)石英中两相（LV）原生流体包裹体显微测温部分原始数据

样号	取样位置	形状	大小/μm	气液比/%	均一温度/℃	冰点温度/	盐度/%	密度
242-1	S14	不规则	6×5	15	199	-5.6	8.68	0.93
242-2	S14	不规则	10×8	15	200	-5.4	8.41	0.93
242-3	S14	不规则	6×6	15	202	-5.7	8.81	0.93
242-4	S14	规则	8×6	15	207	-5.5	8.55	0.92
242-5	S14	规则	8×5	15	210	-5.8	8.95	0.92
242-6	S14	不规则	8×7	15	225	-5.9	9.08	0.90
242-7	S14	规则	6×5	20	234	-6.1	9.34	0.90
242-8	S14	规则	7×4	15	240	-6.5	9.86	0.89
242-9	S14	规则	5×5	15	244	-6.4	9.73	0.89
242-10	S14	规则	5×5	20	254	-6.7	10.11	0.88
242-11	S14	规则	4×4	20	265	-6.5	9.86	0.86
236-1	S14	不规则	6×2	10	225	-4.9	7.73	0.89
236-2	S14	不规则	2×6	5	226	-5.1	8.00	0.89
236-3	S14	规则	2×4	5	230	-4.0	6.45	0.88
236-4	S14	规则	2×2	5	237	-4.7	7.45	0.88
236-5	S14	规则	3×2	10	258	-4.8	7.59	0.85
236-6	S14	不规则	6×8	20	287	-4.6	7.31	0.81

主矿化阶段(II_1)石英中两相（LV）原生流体包裹体显微测温部分原始数据

样号	取样位置	形状	大小/μm	气液比/%	均一温度/℃	冰点温度/℃	盐度/%	密度/g*cm^{-3}	备注
29-1	S16W	不规则	6×10	10	286	-4.1	6.59	0.80	
29-2	S16W	规则	6×12	30	274	-	-	-	
29-3	S16W	不规则	4×10	10	258	-3.0	4.96	0.83	
29-4	S16W	规则	4×6	20	269	-4.2	6.74	0.83	
29-5	S16W	不规则	2×6	20	274	-3.7	6.01	0.81	
29-6	S16W	不规则	6×8	10	253	-3.4	5.56	0.84	
29-7	S16W	规则	2×4	20	258	-2.9	4.80	0.82	
29-8	S16W	规则	2×4	20	259	-3.3	5.41	0.83	
29-9	S16W	不规则	2×2	20	262	-3.5	5.71	0.83	
29-10	S16W	规则	2×14	10	212	-	-	-	
29-11	S16W	规则	6×14	10	197	-3.4	5.56	0.91	
29-12	S16W	不规则	4×14	10	201	-3.3	5.41	0.90	
29-13	S16W	规则	6×8	10	230	-3.5	5.71	0.87	
29-14	S16W	不规则	4×6	10	228	-3.1	5.11	0.87	
29-15	S16W	规则	4×6	10	185	-2.8	4.65	0.92	
29-16	S16W	不规则	2×2	10	186	-	-	-	
73-1	S14	规则	6×4	5	195	-5.6	8.68	0.94	
73-2	S14	不规则	12×10	10	198	-5.7	8.81	0.93	
73-3	S14	规则	6×6	5	201	-5.4	8.41	0.93	
73-4	S14	规则	6×5	10	202	-5.5	8.55	0.93	
73-5	S14	规则	6×4	5	205	-5.6	8.68	0.92	
73-6	S14	不规则	10×7	10	205	-5.5	8.55	0.92	
73-7	S14	不规则	4×3	10	206	-5.9	9.08	0.93	
73-8	S14	不规则	6×4	10	208	-6.0	9.21	0.93	
73-9	S14	不规则	5×3	10	218	-5.8	8.95	0.91	
73-10	S14	规则	6×4		227	-5.6	8.68	0.90	主矿物 80μm
73-11	S14	规则	8×6	15	235	-6.0	9.21	0.89	
73-12	S14	不规则	8×6	15	235	-6.4	9.73	0.90	
73-13	S14	不规则	6×3	10	266	-6.2	9.47	0.86	

主矿化阶段(II_2)石英中两相（LV）原生流体包裹体显微测温原始数据

样号	取样位置	形状	大小/μm	气液比/%	均一温度/℃	冰点温度/℃	盐度/%	密度/g*cm^{-3}	备注
227-1	S8	不规则	2×3	5	170	-1.1	1.91	0.92	
227-2	S8	不规则	2×4	5	172	-1.5	2.57	0.92	
227-3	S8	不规则	2×2	5	165	-	-	-	
227-4	S8	规则	4×4	10	158	-	-	-	
227-5	S8	不规则	4×4	5	171	-	-	-	
227-6	S8	规则	2×4	10	187	-	-	-	
227-7	S8	规则	2×4	5	169	-	-	-	
227-8	S8	不规则	4×6	5	192	-1.2	3.71	0.90	
227-9	S8	规则	4×4	5	176	-	-	-	
227-10	S8	规则	2×4	5	158	-	-	-	
227-11	S8	不规则	2×4	5	179	-1.4	2.41	0.91	
227-12	S8	不规则	4×6	20	288	-2.8	4.65	0.78	
227-13	S8	规则	2×2	5	164	-1.2	3.71	0.93	
227-14	S8	规则	4×6	20	278	-2.8	4.65	0.79	
227-15	S8	不规则	2×4	5		-	-	-	
227-16	S8	规则	4×4	10	286	-3.5	5.71	0.79	
227-17	S8	不规则	4×6	10	242	-3.2	5.26	0.85	
227-18	S8	不规则	2×4	10	211	-2.8	4.65	0.89	
235-1	S14	不规则	2×4	5	174	-1.7	2.90	0.92	
235-2	S14	不规则	4×6	10	210	-	-	-	
235-3	S14	不规则	2×6	5	226	-	-	-	
235-4	S14	规则	2×4	5	230	-	-	-	
235-5	S14	规则	2×4	10	215	-2.1	3.55	0.87	
235-6	S14	规则	2×4	10	168	-1.2	2.07	0.92	
235-7	S14	不规则	4×6	10	173	-	-	-	
235-8	S14	不规则	6×8	20	287	-3.2	5.26	0.78	
235-9	S14	规则	2×4	5	167	-	-	-	
235-10	S14	规则	2×4	5	159	-1.2	2.07	0.93	
235-11	S14	不规则	4×5	5	183	-1.2	2.07	0.90	

主矿化阶段(II_2)石英中两相（LV）原生流体包裹体显微测温原始数据